台灣地區溫室內溫濕度之預測模式*

The Simulation Model to Predict the Temperature and Relative Humidity within Greenhouse in Taiwan

王 鼎 盛
台大農工系

摘 要

本模式之目的在‘預測’溫室內溫濕度環境，提供設施園藝營運管理方式使溫室利用達到最高效率、並使農業工程師或一般建造者在操作、設計、構造溫室時能依預知之情形，建造出最廉價且適合作物生長環境之溫室。

本模式之建立，摒除了利用儀器(日射計、風速計、溫濕度計、電熱偶、資料分析儀等感應器)計測的動態模擬方式，改爲借用氣象預報的氣象資料(溫度、濕度、風速、雲量等），做爲動態模擬依據，不但適用於預測工作，且可根據以往之氣象資資料及植物生理資料，決定植物之最適生長季節，或作爲變更植物種類時溫濕度環境之評估。

本預測模式在民國78年已大致發展完成，並於民國80年利用多點資料蒐集儀配以溫度、濕度、風向風速、日射量等感應器作長期的氣象資料，代入預測模式，經比對印証其精確度相當高。

---

* 本文已刊載於農業工程學報

ABSTRACT

The purpose of this model is trying to predict the highest and lowest temperatures and relative humidity at any day within a greenhouse. Simulation results can provide the most economical and efficient ways to design, construct, and manage the greenhouses. The characteristics of this model is not fully depend on the instant data responsed from sensors, but combines the climate data from Weather Bureau and mathematical simulations. As a result, it is not only predicted easily, but implemented economically. The model has been developed and tested completely in 1989 and 1991, respectively. The precision of this model is found to compare favorably high and acceptable with that from long-term field measured data.

1.前　　言

園藝設施採用各項設施來改善或控制作物之生長環境，以控制提高產量、品質，並調節產期之集約栽培，其建物與一般房屋不同，具有以下之特質：

(1)作物直接在栽培床或地面生長，故不需樓板。

(2)設施內作物需日照以行光合作用，故設施內之屋面及牆面應儘量使用纖細骨架讓更多光線透入。

(3)溫室本身重量較輕，易被風吹浮，因此其抗風性較差。

由於溫室具有以上之特質，溫室內溫濕度環境在外氣候之變化下，形成一特殊之微氣候環境，其影響之諸因子如下：

(一)外氣候：

太陽位置(高度、方位、日長) 大氣透過率(直達、天空、全天日射量、波長組成) 氣溫、濕度、風(風速、風向)、降

雨(量、强度) 空氣組成(CO_2濃度)

㈡構造及設備：

方位、緯度、形狀(長寬高、屋頂斜率及形狀、棟間距、連棟數)、結構組合(樑柱系統、屋面系統、牆面系統) 、構材(斷面、尺寸及材質)、被覆材料(散光性質、光透過率、透過光質、反射率、導熱性質、吸收率)、附屬設備(換氣、保溫、冷卻及加溫設備、反射板、灌溉系統、遮陰網等)

㈢作物群落：

植物結構(植物分佈、種植方位、葉面積指數) 輻射特性(吸收率、放射率) 植物特性(生理特性、光合成、氣孔開閉、葉溫、蒸散量、呼吸量)

㈣其他：

作業門之啓閉(出入次數、大小)、溫室密合度、作業人員(熱收支、呼吸量)、土壤(種類、水份含量、熱貯存及放射)、溫室周圍之地物

由於以上諸因子之影響，溫室溫濕度環境在外氣候之變化下，形成一特殊之微氣候環境，在定性理論方面主要有：

⑴溫室效應：

溫室的透明被覆材料，允許大部份高熱量之太陽短波輻射穿透，卻限制多數室內諸物體因高溫產生之長波輻射穿透出去，以致溫室內的溫度因累積熱量而上昇。

⑵雨作效應：

溫室內外因架設遮陰網或反光網………等遮陰材料使入射的陽光輻射量減少，而使溫室內的溫度不急速上昇，如同太陽下撐陽傘遮陰一樣。

(3)綠洲效應：

溫室外低相對濕度的空氣在進入溫室前，經過水簾(PAD) 或水霧區，而產生絕熱加濕的降溫行爲後，再進入室內與室內高溫空氣混合，達到降溫效果稱之。

(4)煙囪效應：

溫室內外空氣因溫度差產生浮力之關係，外氣低溫空氣由溫室下部開口流入，室內熱空氣由上部流出，達到散熱降溫效果稱之。

(5)風壓效應：

風吹過溫室時，因受溫室阻擋致流態改變，而在溫室表面產生正負大小不同風壓，使外氣由風壓係數大處流入，由風壓係數小處流出，達到換氣降溫效果稱之。

(6)輻射冷卻效應：

溫室被覆材料利用其外表面溫度與天空及週圍環境做長波熱輻射交換。

溫室降溫理論，主要就是根據上面所講的六大效應及熱力學、熱傳遞學及通風理論，來調和溫室內微氣候影響眾因子，達到屋溫室降溫效果。

各種園藝作物均有其特定生長之適宜環境，而設施爲修正其不利條件以達到改善農作物品質、調整產期、提高作物價值之目的，本研究即針對溫室內溫濕度環境之控制模式，模擬作物最適生長之溫濕度環境，並爲將來溫室自動化控制奠定整理基礎。

2.本文目的

本文是以用最低價之自然力量修正農作物生長環境及溫室作業員工作環境爲宗旨。

本文之目的：

(1)以天氣預報資料代替感應器反應，避免大量資金之浪費。

(2)提供設施園藝營運管理方式，使溫室環境管理達最高效率。

(3)預測溫室環境，使能採取防範措施。

(4)作爲改變作物種類或品種之評估。

(5)爲溫室自動化控制系統樹立數理基礎。

(6)提供設計溫室者環境控制之依據。

本文之特色：

(一)以氣象局之天氣預報來預測模擬溫室內溫濕氣微氣候。

(二)取代了利用感應器之動態模擬。

(三)將葉內層水汽擴散阻力係數以時間函數視之。

(四)本模式以實物測試修正式中若干係數而得之模式，適合本省之使用。

(五)寫成 PC FORTRAN 程式以資推廣使用。

3.文獻探討

3－1 相關研究及演進

溫室氣候在先進國家中已發展了幾十年，早期之研究主要以實驗及靜態分析爲主，主要之研究群有英國Morris，Whittle ，Lawrence (1954，1959，1960)所領導的 NIAE 研究組及德國Renard，Hiller(1956，1957)爲首之研究小組。

六十年代，隨著熱力學、熱傳遞學之發展，定常狀態(Steady state) 之熱平衡方法被引用到溫室大氣候分析，主要研究者有

Yabuki, Imazu(1961)；Siebert，Renard(1962) Businger(1963)；Sugi, Takakura(1965)，其中以Businger 首創利用迭代法技巧由溫室環境因子預估溫室內溫度，此法不但爲溫室氣候模擬立下一新里程碑，亦加速後來衹定常狀態(Unsteady state) 分析之腳步。

跟隨熱傳遞學之發展，分析溫室熱環境之非定常狀態也分爲數學解析法(Analytical methods)及數值方法(Numerical methol)二種路線，在解析方面有用線性加權法(Linearity－Weighting function method)(Takakura, 1967, 1968)；被動網路法(Rassive network method)(Frroehich et al., 1979)；及用類比電腦解(O' Flaherty，1973.)。而在數值方法方面首推日人Takakura等(1971)，用CSMP模擬語言做數值模擬，明確定出系統之邊界條件，如內表面凝結，溫室土層之二維分析等。此法隨電腦之進步而突發飛猛進，相繼爲人引用，有kimball(1973, 1981)；Soribe, Curry (1973)；Kindelan(1980)；Chandra et al. (1981)；Avissar, Mahrer(1982)；Von Elsner(1982)；……等人相繼提出類似之報告。至1983年 G. P. A. Bot 提出了一前所未有之複雜模式，主要包括 3個子模式(光透過；熱及質量傳遞；控制函數)。

1983 年 ISHS(世界園藝協會)，有感於模擬程式繁多，令人無所適從，故選取 C. H. M. Van Bavel； T. Takakura； G. P. A. Bot (1985) ·三人之模式爲代表，在美國 Lubbock ，日本 Tokyo，荷蘭 Wageningen， 三地實測比較，於 1985 年報告指出，在相同條件下，其運算方法雖不盡相同，但其結果卻十分相近(在下節討論)。

3－2 文獻的比較及探討

Takakura 等人於 1971 年所提出預測溫室溫、濕度變化之電腦模擬程式中，加入了植物蒸發蒸散量，濕床土的蒸發量，玻璃內表面之凝結量等之分析，連全天光照中之直射光及天空漫射光也分別測計

其值；直射光相對於溫室之平均透過率則採用 Threlkeld (1970) 所提出的方法求出。在溫室外氣溫、比濕度、風速、直射光、漫射光之輸入方面則採用富利葉函數(Fourier series)。可貴的是在此程式中也計及到溫室之通風、加熱、蒸發冷卻等狀況之變動。在水汽之質量傳遞方面，也明確表示出在傳導面的組成及面與宜氣間之比濕度差的大小對質量傳遞的多寡影響甚鉅，因此計測植物葉片之水汽傳遞量時可將氣孔的開閉情形視爲時間函數代入；另在長波輻射熱交換方面則採用線性方式處理。綜合以上觀念及變因控制簡化後所做模擬結果顯示出：(1)長波輻射熱交換(2)植物蒸發蒸散量(3)濕床土蒸發量三項所佔份量頗重，絕對不能忽視。

本模擬程式因顧及台灣柔日本均屬海洋型氣候且日本之溫室發展背景及路線與台灣相近，故選取 Takakura 之模式爲主要架構，加入外氣候模擬代替儀器(Sensor)之動態模擬，且顧及植物之生長特性，並引用各國相關研究報告、文獻之成果修正模式，使更適合台灣溫室環境之模擬。

4.外氣候模擬

本模式之目的在於‘預測’溫室內溫濕度環境，且爲摒除外接感應器，做最快速的全天模擬，故需先對外氣候溫濕度做最完善的模擬，此外氣候之模擬對於溫室整體預測影響很大，也是整個模式準確度的重心。

4－1 外氣溫變化之模擬

根據美國統計歷年來每日氣溫變化之資料顯示每日氣溫之變化可以一條標準曲線表示之，由此僅需知每日之最低及最高溫度，即可推算一日中任意時刻之氣溫變化，此標準曲線形式如圖4-1，一日中任一時刻氣溫之計算公式如下式：

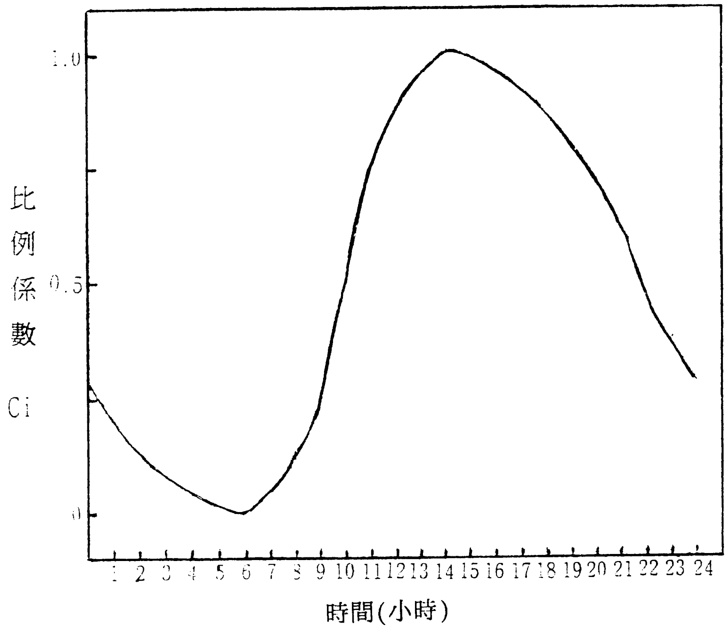


圖4.1 美國外氣溫日變化標準曲線圖

$$T_i = T_{mis} + (T_{max} - T_{min})\ C_i \qquad (4-1)$$

故由氣象局預測之最高溫度 Tmax 及最低溫度 Tmin ，再由上圖中查出該時刻之Ci值，即可計算出該時刻之氣溫，此舉是爲了替代使用感測器而完成更有效率之預測工作。

以下即是將台灣大學大氣系所測得的78年全年溫度資料整理求出各時刻的平均值，再將此平均值化爲0至1的外氣溫標準曲線如下所示：

時	Ci	時	Ci	時	Ci	時	Ci
0	0.1566	6	0.0000	12	0.9599	18	0.4627
1	0.1220	7	0.0729	13	1.0000	19	0.3552
2	0.0856	8	0.3042	14	0.9672	20	0.2951
3	0.0546	9	0.5501	15	0.8816	21	0.2495
4	0.0273	10	0.7450	16	0.7468	22	0.2204
5	0.0073	11	0.8816	17	0.6120	23	0.1913

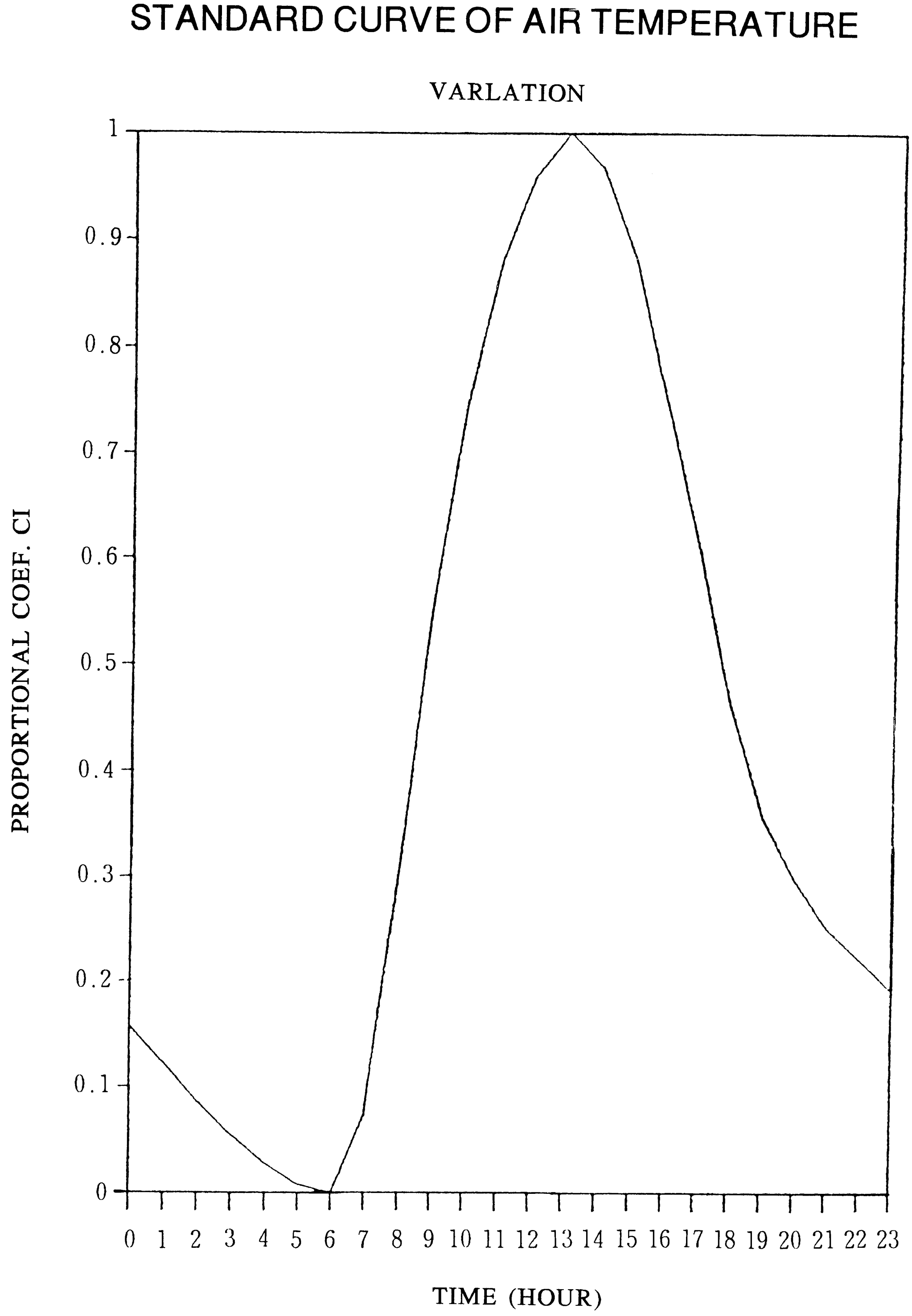


圖4.2 台灣大學校區外氣溫日變化標準曲線圖

4－2 外氣相對濕度變化之模擬

同理標準曲線需引用台灣歷年氣象資料，以適本地之預測工作，因此亦採用台大大氣系所測得的78年全年濕度資料整理求出各時刻的平均值，再將此平均值化為 0至1 的外氣濕度標準曲線如下所示：

時	Di	時	Di	時	Di	時	Di
0	0.9291	6	1.0000	12	0.0313	18	0.6002
1	0.9467	7	0.9785	13	0.0000	19	0.7333
2	0.9621	8	0.8009	14	0.0593	20	0.8063
3	0.9767	9	0.5309	15	0.1622	21	0.8590
4	0.9836	10	0.2901	16	0.2975	22	0.8888
5	0.9886	11	0.1223	17	0.4337	23	0.9172

其預測公式如下：

$$RH_i = RH_{min} + (RH_{max} - RH_{min})\, D_i \qquad (4-2)$$

4－3 太陽位置

溫室中之熱量來源大部份來自日照，故要探討溫室熱環境，首先須了解太陽在該區之位置，一般太陽位置可由太陽高度角 h 及太陽方位角 D 來決定，其計算方式如下：

$$\sin h = \sin\Psi \sin\delta + \cos\Psi \cos\delta \cos t \qquad (4-3)$$

$$\cos A = \frac{\sin h \sin\Psi - \sin\delta}{\cos h \cos\Psi}$$

$$\cos A = \frac{\sin t \cos\delta}{\cos h} \qquad (4-4)$$

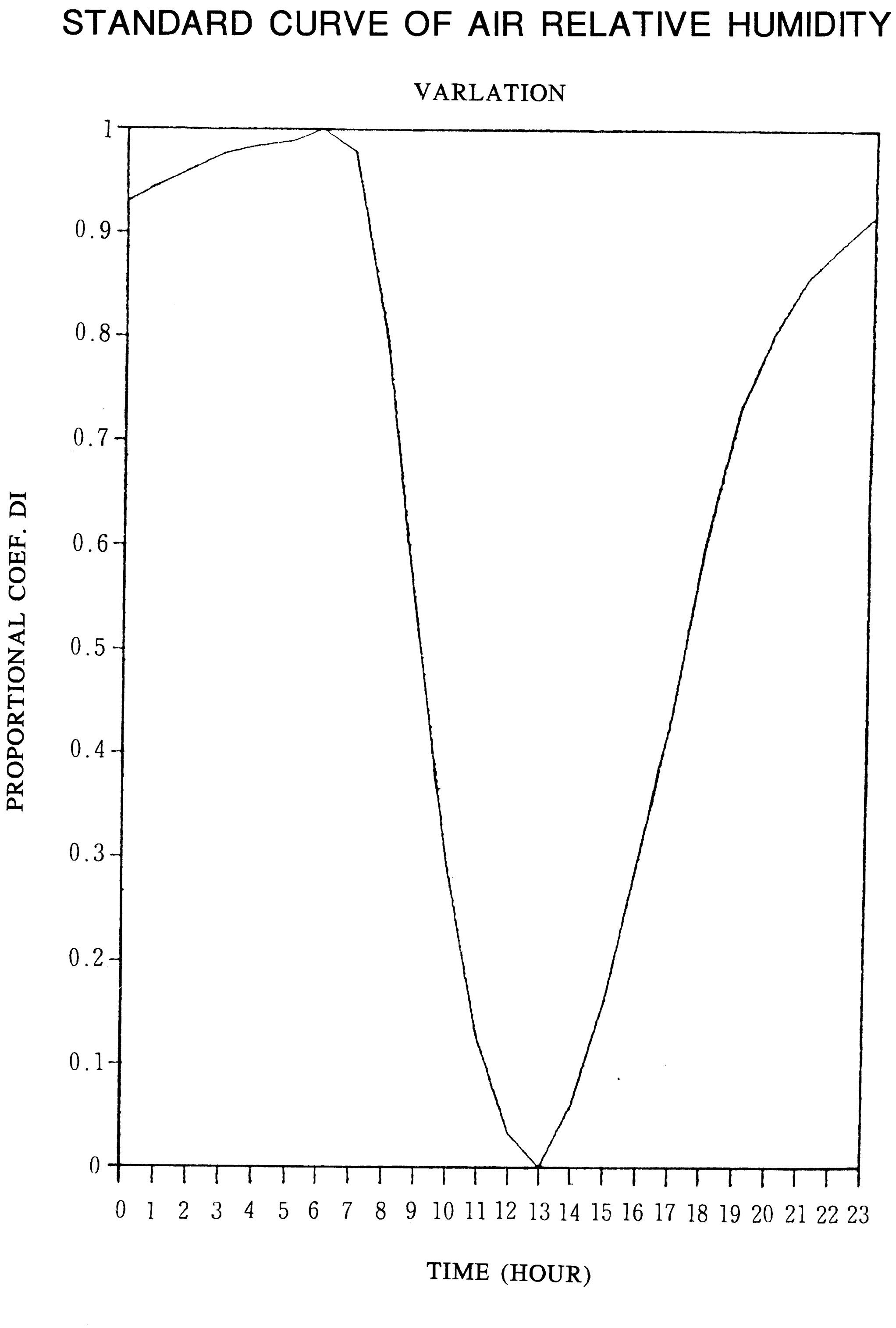


圖4.3 台灣大學校區外氣相對濕度日變化標準曲線圖

其中

Ψ ：表緯度，半球 $\Psi > 0°$ ，南半球 $\Psi < 0°$

δ ：表太陽赤緯，春分、秋分 $\delta = 0°$ ，夏至 $\delta = 23° 27'$，冬至 $\delta = -23° 27'$，因太陽赤緯每年週期性變動其計算方式如下：

$$\sin\delta = \sin 23° 27' \sin B$$

$$B = 360(n-81)/365 \ [°]$$

t ：表時角，眞太陽時之正午爲 0° ，午前爲正，午後爲負，一小時15° 之分割，其換算式如下：

$$t = (ta - 12) * 15$$

$$= \{ ts + (E + \frac{l - l_s}{5} - 12) \} * 15$$

ta ： 眞太陽時

ts ： 標準時

L ： 經度(東經爲正，西經爲負)

Ls ： 標準子午線經(東經爲正，西經爲負)

E ： 均時差，其近似公式如下：

$$E = (9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B)/60$$

$$= 0.1645 \sin 2B - 0.1255 \cos B - 0.025 \sin B$$

台灣地區位於北緯22° ～25° 10'，東經119° 33'～121° 51'之間，若以地理中心北緯23.5° ，東經120° 42'，6 月20 日標準時中午12點爲例，太陽高度爲 89.58° ，方位爲 57.785° ，亦即太陽在此時位於地理中心頭頂正上方直射該地。

4－4 大氣透過率

大氣層雖僅30公里厚，不及地球直徑之百分之一，但對太陽輻射分佈之影響頗大，到達地面的太陽輻射量會因大氣的吸收、反射和散射而變化，一般而言，天氣晴朗、空氣乾燥，大氣透過率約 0.8～0.9 之間，陰雨天約 0.2～0.1 之間，甚至於 0，顯然此係數直接影響到溫室所受太陽輻射之大小，亦即微氣候環境變化之關鍵要因之一。

再則，太陽輻射直接由太陽直射而來、不改變輻射方向者稱之爲直達日射，若經大氣吸收、散射或地面反射等改變方向的輻射稱之爲散漫日射或天空日射量，而直達日射量與天空日射量之總和即爲全天日射量，各量之計算方式如下：

(1)直達日射量＝ JP **(csc h)／r^2 (4－5)

J_0：太陽常數約 1164〔Kcal／m^2〕

P ：大氣透過率

h ：太陽高度

r ：地球與太陽間之平均動徑，其值約爲 1 左右

(2)天空日射量

$$= \frac{1}{2} J_0 \text{ Sin } h \left\{ \frac{1 - P^{**}(\csc h)}{1 - 1.4 \text{ Ln}(P)} \right\} \quad (4-6)$$

(3)全天日射量＝直達日射量＋天空日射量

由以上3式可知，溫室的微氣候熱量來源取決於太陽位置及大氣透過率，而大氣透過率與海拔高度、雲量、大氣壓力關係密切，然至目前爲止，除非以儀器實際測量該區之大氣透過率外，由於雲量之變化莫測且近年來空氣污染之關係，無精確模式可資運算，在此提出一較接近台灣現有大氣透過率之實驗公式：

$$P = a_0 + a_1 \ e^{-k\csc\alpha}$$

a ，a ，k，稱爲大氣模數，如表2-1所示，海拔不同時可用內插或外插方法求得

表 4-1 大氣模數

	海平面上高度(KM)					
	0	0.5	1	1.5	2	2.5
	23 Km 模糊模型					
a_0	0.1283	0.1742	0.2195	0.2582	0.2915	0.320
a_1	0.7559	0.7214	0.6848	0.6532	0.6265	0.602
k	0.3878	0.3436	0.3139	0.2910	0.2745	0.268
	5 Km 模糊模型					
a_0	0.0270	0.063	0.0964	0.126	0.153	0.177
a_1	0.8101	0.804	0.7978	0.793	0.788	0.784
k	0.7552	0.573	0.4313	0.330	0.269	0.249

5.模式之建立

溫室內溫、濕度平衡建立的基準點，主要依據熱收支平衡及水收支平衡之原理。

5－1 熱收支式及水收式

(1)熱收支式

溫室內空氣獲得之熱量

＝被覆材料內表面之對流傳熱量＋換氣產生內外空氣對換之顯熱傳達量＋作物體表面之顯熱傳達量 ＋ 加熱器之熱傳達量 － 冷卻器之熱傳達量

⑵水收支式

溫室內空氣獲得之水汽量

＝內外空氣交換之水蒸氣流入量＋土壤表面之蒸發量＋作物葉面之蒸發蒸散量－被覆材料內表面之凝結量

基於此基本原理，我發展了整個溫室內溫、濕度平衡之理論。

5－2 溫室內溫濕度平衡理論

將溫室分爲被覆材料、室內空氣、室內濕度、植物及土壤等五個自由體來探討其熱量及水汽的平衡，再整合此五個自由體來完成整體模式，自由體的平衡分述如下：

5－2－1 被覆材料之熱平衡

被覆材料之熱平衡可分爲三部份即材料外表面、材料內層及材料內表面，來討論之，請參閱圖5－1

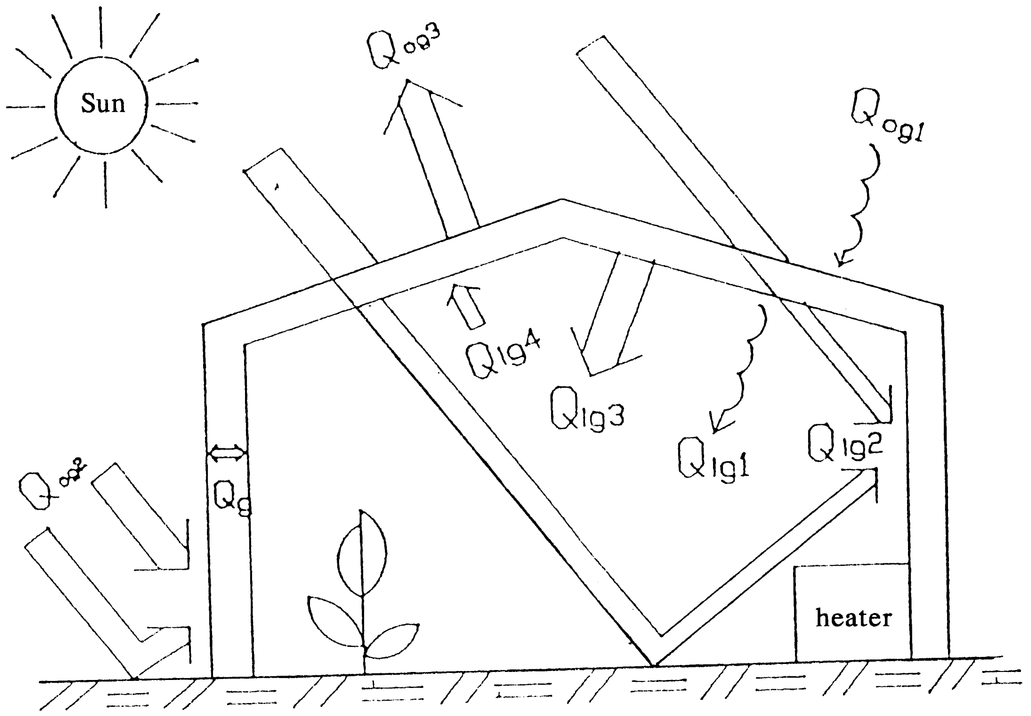


圖5.1 被覆材料之熱平衡圖

(1)被覆材料外表面

1)被覆材料外表面與空氣之對流熱交換

$$Q\ og_1 = h\ ou\ (t)\,[\theta\, ou(t) - \theta\, og(t)]$$

2)短波輻射熱交換

$$Q\ og_2 = \alpha g\,[(t)\ (1 + \eta ss\ \gamma os)\ R\ dd(t) + Rss(t)]\ fs(t)$$

3)長波輻射熱交換

$$Q\ og_3 = \eta g\ R\ lg(t)$$

由1)～3)得材料外表面所獲得熱量爲

$$Q\ go = Q\ og_1 + Q\ og_2 - Q\ og_3$$

(2)被覆材料之熱傳導

$$Q\ g = \frac{Kg}{Lg}\,[\theta\, og(t) - \theta\, ig(t)]$$

(3)被覆材料內表面

1) 被覆材料內表面與空氣之對流熱交換

$$Q\ ig_1 = h\ in\ (t)\,[\theta\, ig(t) - \theta\, in(t)]$$

2) 材料內表面與直達日射反射之吸收量

$$Q\ og_2 = \tau g\,[\tau d(t)\ (\delta(t) + \eta is\ \gamma isp)\ R\ dd(t)\ ]\ dd(t)\ fs(t)$$

3) 被覆材料內表面對植物、土壤等之輻射熱交換

$$Q\ ig_3 = \Sigma\, \varepsilon g \varepsilon j \eta gi\ \sigma C\ gj\,[\theta\, ig(t) - \theta\ j(t)]$$

4) 被覆材料內表面與水蒸氣之熱交換

$$Q\ ig_4 = \mu\ km\ \xi\, ig\,[Win(t) - Ws(\theta\, ig)]$$

綜合 1)～4) 得被覆材料內表面之熱量爲

$$Q\ gi = Q\ ig_1 - Q\ ig_2 + Q\ ig_3 + Q\ ig_4$$

5－2－2 室內空氣能量平衡

室內空氣能量平衡可參照圖5－2所示分爲五部份來討論：

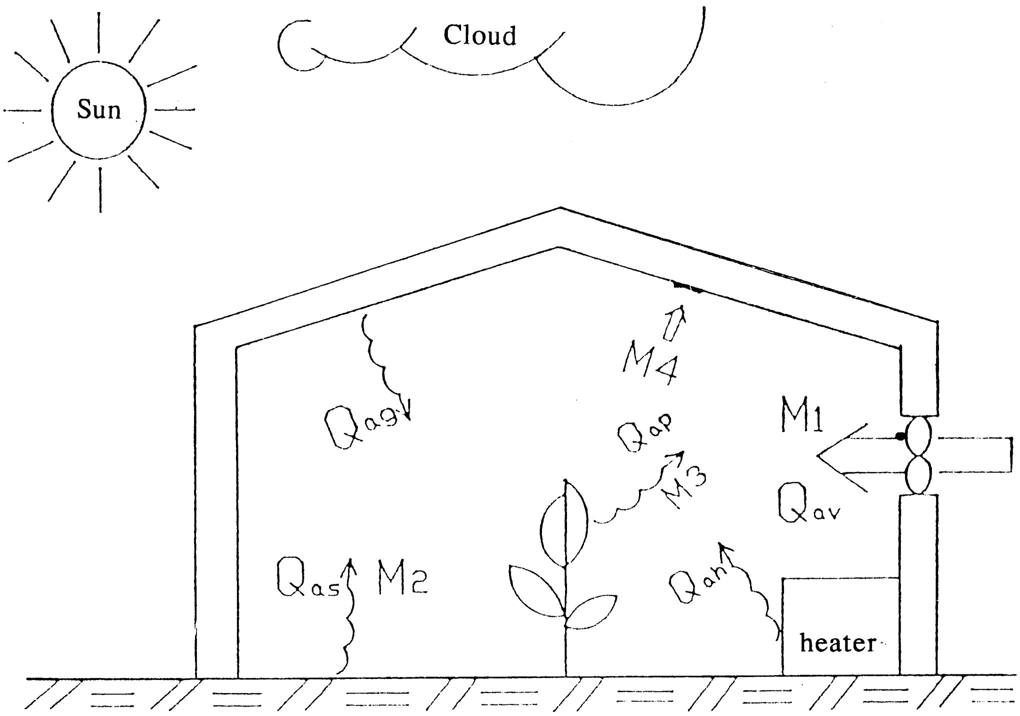


圖5.2 室內空氣能量及水汽(濕度)平衡圖

(1)空氣與被覆材料之熱對流交換

$$Q\ ag = h\ in\ (t)\ [\ \theta\ ig(t) - \theta\ in(t)\ ]\ Dg$$

(2)室內外通風之對流熱交換

$$Q\ av = h\ ven(t)\ [\ \theta\ ou(t) - \theta\ in(t)\ ]\ Dg$$

(3)空氣與土壤之對流熱交換

$$Q\ as = h\ is\ (t)\ [\ \theta\ is(t) - \theta\ in(t)\ ]\ Ds$$

(4)空氣與加熱器之對流熱交換

$$Q\ ah = h\ ih\ (t)\ [\ \theta\ h(t) - \theta\ in(t)\ ]\ Dh$$

(5)空氣與植物之對流熱交換

$$Q_{ap} = h_{ip}(t)\,[\,\theta p(t) - \theta in(t)\,]\,Dp$$

由(1)～(5)可知室內空氣能量變化為

$$C_a V_g \frac{d\theta in(t)}{dt} = Q_{ag} + Q_{av} + Q_{as} + Q_{ah} + Q_{av}$$

5－2－3　室內空氣濕度平衡

室內空氣濕度平衡可參照圖5-2所示，亦分為四部份來討論：

討論：

(1)通風之水蒸氣質量傳遞

$$M_1 = \rho\ h'ave(t)\,[\,Wou(t) - Win(t)\,]\,Ag$$

(2)土壤與空氣之水蒸氣質量傳遞

$$M_2 = K_m \xi_{is}\,[\,Ws(\theta is) - Win(t)\,]\,As$$

(3)葉子與空氣之水蒸氣質量傳遞

$$M_3 = \frac{\rho}{r_l(t) + r_a}\,[\,Ws(\theta p) - Win(t)\,]\,2\,Ap$$

(4)被覆材料與空氣之水蒸氣質量傳遞

$$M = K_m \xi_{ig}\,[\,Win(t) - Ws(\theta ig)\,]\,Ag$$

故由(1)～(4)可知室內空氣中水蒸氣質量變化為

$$\rho\ Vg \frac{d\,Win(t)}{dt} = M_1 + M_2 + M_3 - M_4$$

5－2－4　植物葉表面之能量平衡

植物葉表面之能量平衡可參照圖5-3所示，分為四部份來討論：

(1)葉表面與空氣之熱流交換

$$Q_{pa} = h_{ip}(t)\,[\,\theta in(t) - \theta p(t)\,]\,2\,Ap$$

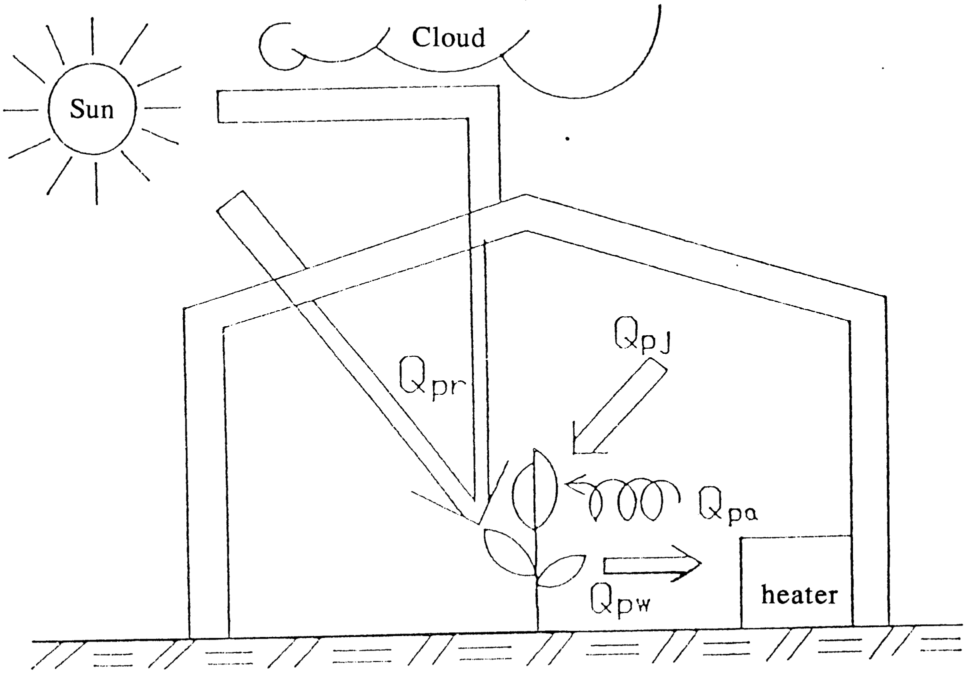


圖5－3 植物葉表面之能量平衡圖

(2)葉面所吸收之輻射量

$$Q_{pr} = \rho p[\tau g(t)\ Rsd(t) + \tau s\ Rss(t)]\ f\ s(t)\ Ap$$

(3)植物對被覆材料、土壤、加熱器等之輻射熱交換

$$Q_{pj} = \Sigma\ \varepsilon p \varepsilon j\ \eta pj\ \sigma C\ pj[\theta j\ (t) - \theta p\ (t)]\ Ap$$

(4)植物對空氣之潛熱傳遞

$$Q_{pw} = \frac{\rho\ \mu}{r\ l\ (t) + r\ a}[Ws\ (\theta p) - Win\ (t)]\ 2\ Ap$$

由(1)～(4)可知植物葉表面之能量變化為

$$C\ pl\ Vp\ \frac{d\theta\ p(t)}{d\ t} = Q_{pa} + Q_{pr} + Q_{pj} - Q_{pw}$$

5－2－5 土壤之熱傳導能量平衡

爲簡化模式，如圖5－4將土壤以適當之大小切割分區討論，並有下列幾項假設：

(1)此模式爲二維之熱傳導模式，不考慮縱向之熱傳。

(2)地表層爲溫層，但溫室內外之地表溫度可不同。

(3)土壤溫度以Y軸爲中心，左古對稱分佈。

(4)$\triangle Y_6$下層爲恆溫層，終年溫度不變。

有了以上之假設我們即可分區的列出其熱傳方程式，由於區域太多，無法一一列舉，僅列出幾個做爲代表，其餘區塊依此類推。

(1)$\triangle X_5$ $\triangle Y_1$ 區域之熱傳方程式

$$Cs \triangle X_5 \triangle Y_1 \frac{d\theta is(t)}{dt} =$$

$$\left\{\frac{Ks}{(\triangle Y_1 + \triangle Y_2)/2}\left[\theta_{24}+\theta_{25}+\theta_{26}-3\theta is\right]\triangle X_5 /3\right\}$$

$$+ \{\Sigma \ \varepsilon s \ \varepsilon j \ \eta sj \ \sigma \ Csj\left[\theta j(t)-\theta is(t)\right]\triangle X_5\}$$

$$+ \{h \ is(t)\left[\theta in(t) - \theta is(t)\right]\triangle X5\}$$

$$+ \{\alpha s\left[\tau g(t) \ Rsd(t) + \tau s \ Rss(t)\right] fs(t) \triangle X_5\}$$

$$- \{\mu Km \ \xi \ is\left[Ws \ (\theta is) - Win \ (t)\right]\triangle X_5\}$$

(2)$\triangle X_5$ $\triangle Y$ (3)$\triangle X$ $\triangle Y$ 區域之熱傳方程式

$$Cs \triangle X_2 \triangle Y_1 \frac{d \ \theta os(t)}{dt} =$$

$$\left\{\frac{Ks}{(\triangle Y_2 + \triangle Y_3)/2}\left[\theta_{25} \ (t)-\theta_{35} \ (t)\right]\triangle X_5\right\}$$

$$+\left\{\frac{Ks}{(\triangle Y_3+\triangle Y_4)/2}\left[\theta_{45}(t)-\theta_{35}(t)\right]\triangle X_5\right\}$$

$$+\left\{\frac{Ks}{(\triangle Y_4+\triangle Y_5)/2}\left[\theta_{34}(t)-\theta_{35}(t)\right]\triangle Y_3\right\}$$

$$+\left\{\frac{Ks}{(\triangle Y_5+\triangle Y_6)/2}\left[\theta_{36}(t)-\theta_{35}(t)\right]\triangle Y_3\right\}$$

(3)△X △Y區域之熱傳方程式

$$Cs\ \triangle X_2\ \triangle Y_1\ \frac{d\,\theta os(t)}{d\,t}=$$

$$\left\{\frac{Ks}{(\triangle Y_1+\triangle Y_2)/2}\left[\theta_{22}(t)-\theta_{23}(t)-2\theta os(t)\right]\triangle X_2/2\right\}$$

$$-\{\eta s\ Rls(t)\triangle X_2\}+\{\alpha s\left[R\ sd(t)+R\ ss(t)\right]\}\triangle X_2$$

$$-\{h\ os(t)\left[\theta ou(t)-\theta os(t)\right]\triangle X_2\}$$

$$-\{\mu\ K\ m\ \xi os\left[Ws(\theta os)-W\ ou(t)\right]\triangle X_2\}$$

以此方式考慮區域之熱傳方程式，共可列出二十多個相關方程式，若區塊分割越細則方程組更多，但所幸交由電腦處理，不致太過麻煩。

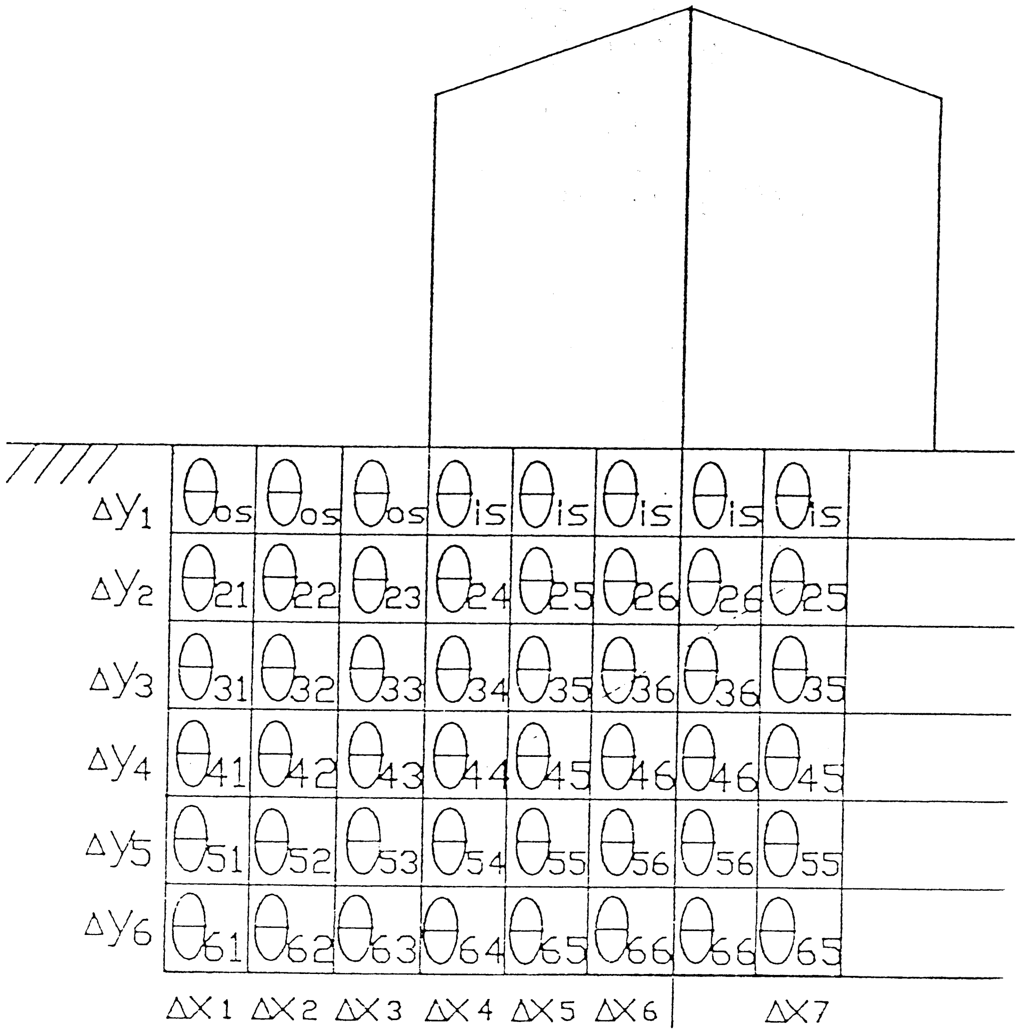


圖5－4 土壤之熱傳導能量平衡圖

5－3 模式計算流程圖

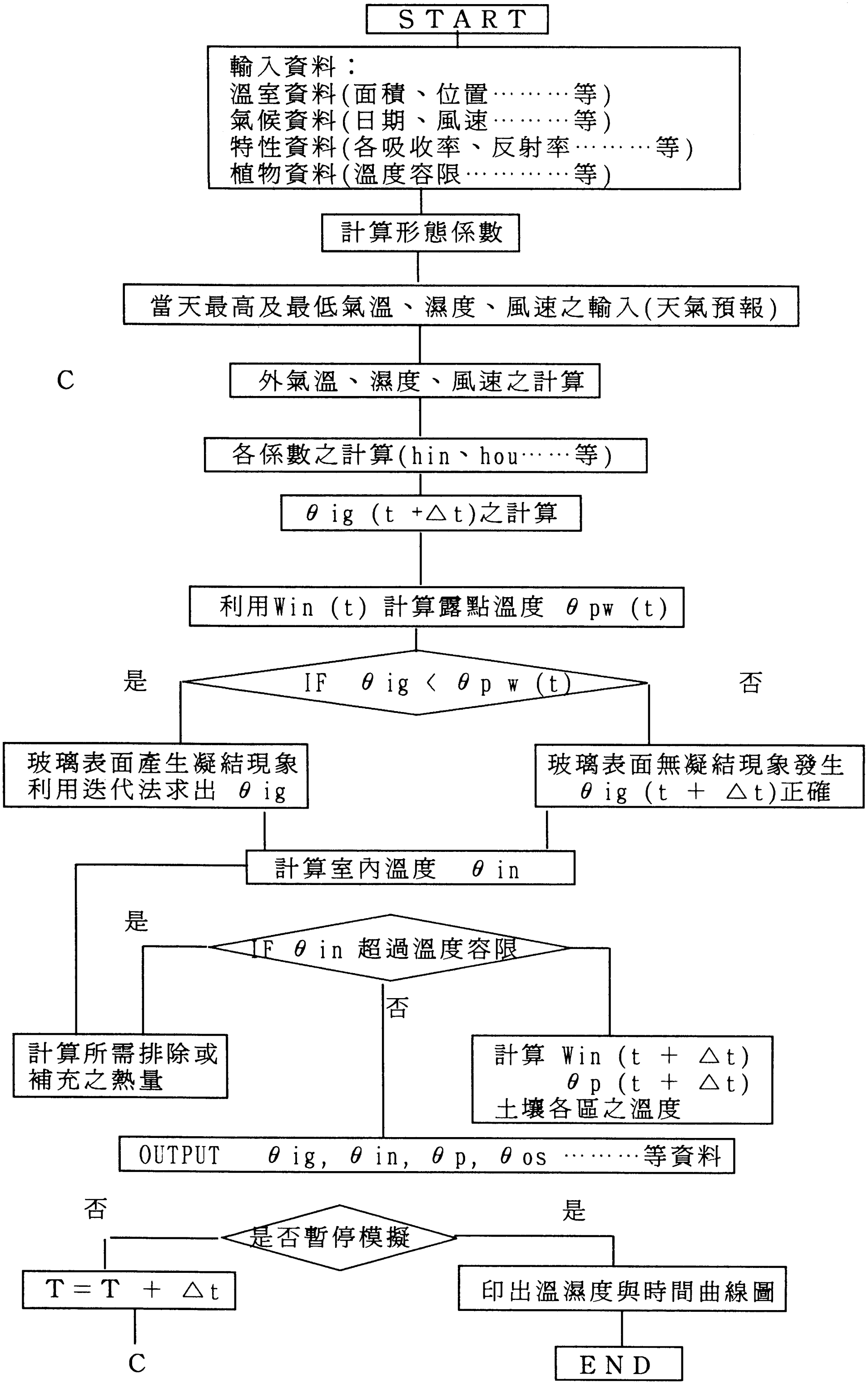


圖5.5 模式計算流程圖

6.溫室內溫濕度模擬實驗之計測

6－1 施測目的

利用儀器觀測溫室微氣候環境，以便作爲溫室內溫濕度模擬模式之驗證及修改。

6－2 實驗場所

園藝系附設農場之洋香瓜簡易溫室。

6－3 施測項目

(1)溫度－溫室微氣候中熱量平衡最重要、明顯的指標。

(2)濕度－溫室微氣候中水汽平衡最重要、明顯的指標。

(3)日射量－溫室熱量的主要來源。

(4)風速－通風換氣、熱對流的要因之一。

(5)溫室大小尺寸、方位、測點分佈位置。

(6)透過率－透過被覆材料到達溫室內部能量之因子。

(7)外氣候－包括溫度、濕度、風速、日射量等條件以做比對之用。

(8)土壤溫度－土壤熱平衡之指標。

(9)植物葉溫－植物熱平衡之指標。

6－4 按裝

6－4－1 系統按裝

感測器、資料蒐集機、電腦及貯存機等構成計測系統示如圖6－1所示：

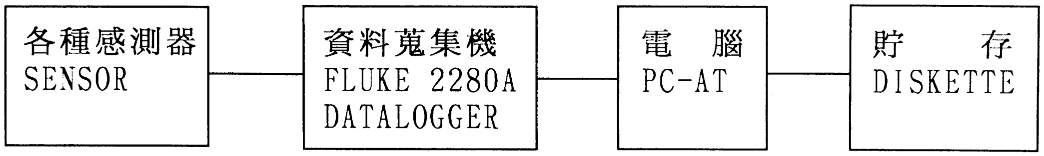
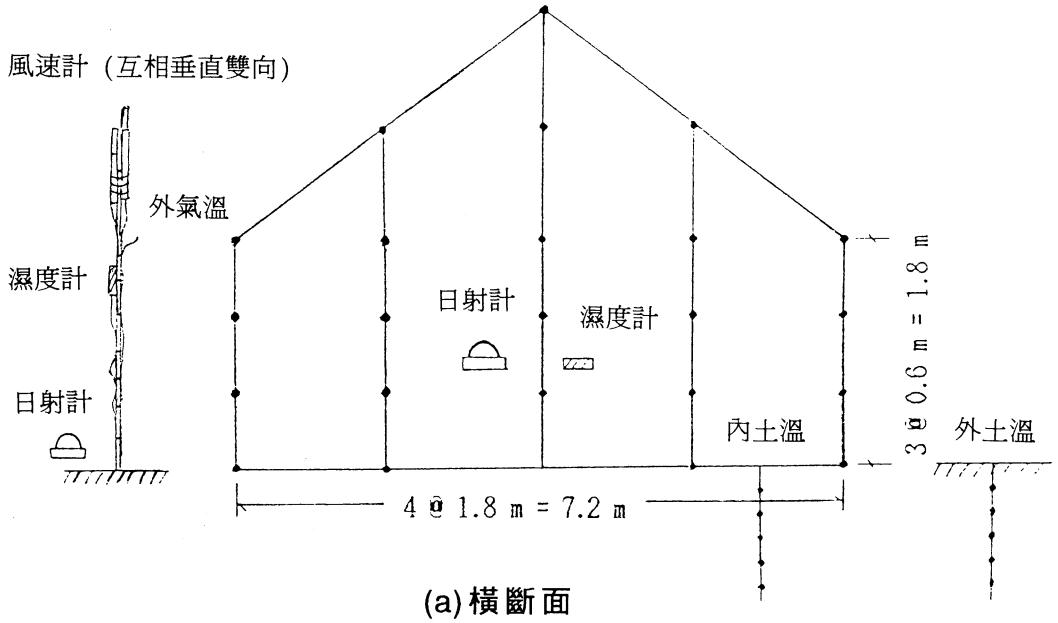


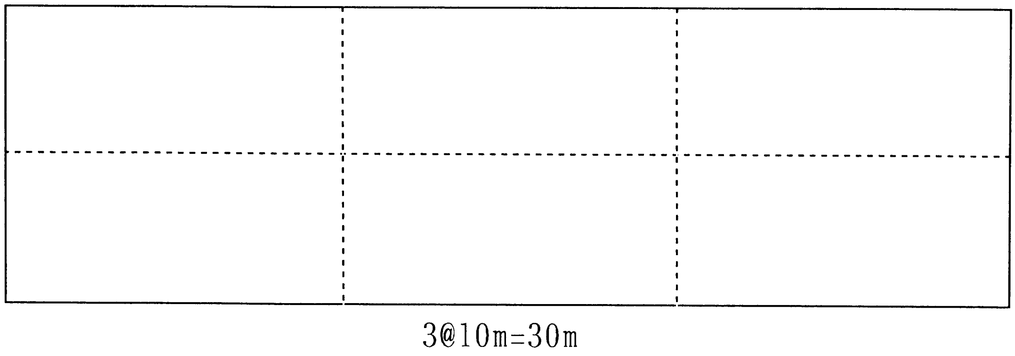
圖6－1 計測儀器系統

6－4－2　測點之按裝(感測器部份)

各測點之布置示於圖6－2



(a)橫斷面



(b)縱斷面

圖6－2 測點布置圖 (a) 橫斷面 (b) 縱斷面

6－5 內業

等溫線圖之繪製採用電腦等溫線繪製的套裝軟體來繪圖，此套裝軟體之名稱爲SURFER Access System Version 3.00 Copyright (c) Golden Software Inc., 1987.

6－6 討論

(1)由於本模式在發展之初較忽略周圍建物對溫室的遮蔽及輻射之影響，並以單棟溫室之熱傳爲模擬主體，且考慮內外土壤深層的熱傳效應，故實驗場所之選定應以單棟爲宜，且周圍空曠、溫室內外爲土壤地面可測得土壤深層土溫者。

(2)本模式是在"均質"的假設下所建立的，故對溫室內之溫濕度測點應監可能增設，以增加平均值的代表性，並對溫室邊界的溫濕度加以考慮，如圖6-2所示溫室內溫度測點高達80點，分爲 2個邊斷面及 2個中央斷面。

(3)對於濕度及土溫由於儀器的限制，內外濕度各取一點，內外土溫各 5點，然亦選擇最具代表性的位置施測。

7.實測資料之處理方式

本模式是建立在"均質"的假設之上，故在能量平衡後，不論是被覆材料、室內空氣、室內濕度、植物溫度及土壤區塊都處於"均溫狀態"，即被覆材料、室內空氣、室內濕度、植物溫度及土壤區塊僅各由一物理量來表示，此與實際情形不同，溫室內的空氣溫度相當不均一，故必需將實測值做一分析整理。

7－1橫斷面平均溫度之計算

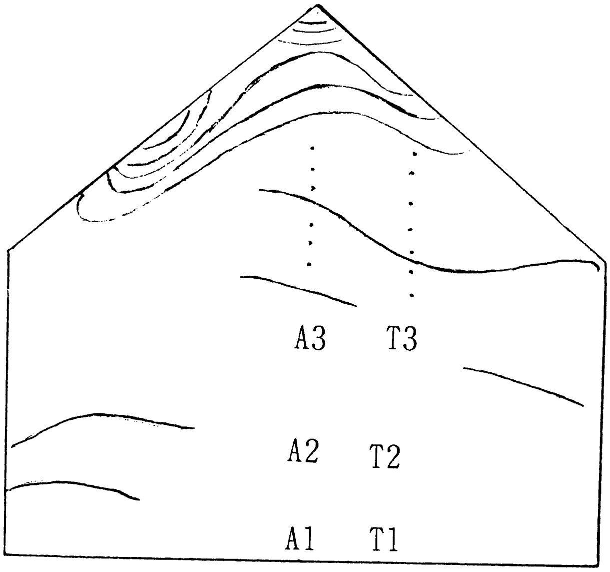


圖7－1 等溫線圖

如上圖所示，依均衡狀態的假設應用至溫室橫斷面平均溫度之計算可知，橫斷面之平均溫度可以面積的加權比爲代表

$$T = \frac{A1T1 + A2T2 + \cdots\cdots\cdots + AnTn}{A1 + A2 + A3 + \cdots\cdots\cdots + An} \qquad (7\text{-}1)$$

其中A1、A2……An爲由等溫線所構成之不同溫度區塊的面積，此面積可由求積儀求出；而T1 、T2………Tn爲各區塊之溫度，此溫度爲上下等溫線之平均值。

7－2 溫室內平均室溫之計算

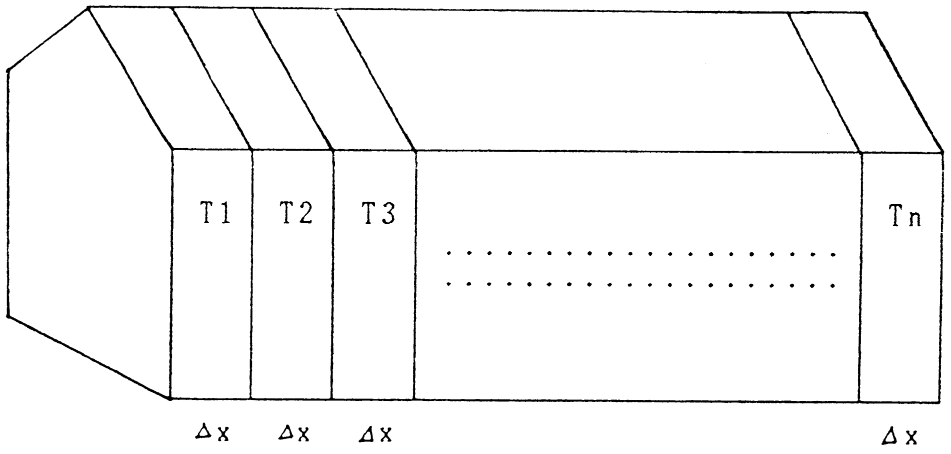


圖7－2 溫室切割圖

依照7－2之方式計算出各橫斷面的平均溫度，如圖中之T1……Tn，若所截取的各橫斷面之厚度均為△X，則由於橫斷面面積均相同，故可得溫室內之平均溫度為

$$T=\frac{T1+T2+\cdots\cdots+Tn}{n} \qquad (7-2)$$

其中T1、T2………Tn為由(7－2)式所求出之各橫斷面溫度，n為橫斷面截割個數。

7－3 溫室平均溫度計算結果

將電腦所繪出之等溫線圖，利用求積儀求出各斷面各溫度區塊之面積，代入(7－1)式計算出各斷面之平均溫度，再將各斷面之平均值及厚度代入(7－2)式求出溫室內溫度的平均值，其結果如表7－1所示

表7－1 溫室內空氣平均值計算結果

時間	斷面平均溫度				溫室平均溫度
	斷面 1	斷面 2	斷面 3	斷面 4	
1	25.70	25.70	25.80	25.60	25.72
2	27.40	27.60	27.90	27.60	27.67
3	27.10	27.00	27.30	27.20	27.15
4	27.00	27.00	27.00	26.80	26.97
5	27.40	27.50	27.60	27.30	27.48
6	27.50	27.40	27.60	27.40	27.48
7	32.80	32.30	32.00	33.40	32.47
8	32.90	32.90	32.60	33.30	32.87
9	35.00	33.90	34.00	34.60	34.23
10	37.40	37.00	37.10	36.20	36.97
11	36.90	37.00	37.90	39.70	37.73
12	36.60	37.70	37.50	38.70	37.62
13	39.50	39.30	40.30	40.60	39.88
14	36.60	36.60	36.60	38.90	36.98
15	36.10	36.00	37.10	38.20	36.75
16	36.20	35.20	35.20	35.90	35.48
17	35.70	34.70	34.40	34.80	34.78
18	31.10	31.10	31.10	31.30	31.13
19	30.00	30.20	30.20	30.30	30.18
20	29.40	29.60	29.70	29.50	29.58
21	28.30	28.50	28.60	28.70	28.53
22	27.70	27.60	28.00	27.60	27.75
23	28.20	28.40	28.50	28.40	28.40
24	28.00	28.00	28.20	28.10	28.08

7－4 討論

(1)由(7－1)式及(7－2)式可知△X必需趨於零，亦即 n 趨於無限大，所求出的平均溫度才趨於均衡狀態時的空氣溫度，由於熱電偶線及儀器的限制，僅能切割四個斷面，故所求出之平均值爲近似值。

⑵若每區塊之厚度不同則(7－2)式須改為

$$T=\frac{X1T1+X2T2+\cdots\cdots\cdots+XnTn}{X1+X2+X3+\cdots\cdots\cdots+Xn}$$

本實驗所截取之斷面厚度即不相同，各為 5、10、10、5公尺。

8.模式模擬

本模式之模擬步驟如流程圖所示，須先輸入資料(包括溫室、氣候、植物、熱傳特性等資料)如後。

8－1 模擬之資料輸入

⑴溫室所在地之緯度	+25.00度
⑵溫室所在地之經度	+121.0度
⑶溫室所在地之海拔	+15 公尺
⑷模擬日期	6 月28日
⑸開始模擬時間	0 時30分
⑹模擬結束	29日 1時
⑺模擬時間間隔	2.5分
⑻雲量係數(晴天)	0.01
⑼模擬當天最高氣溫	37.5℃
⑽模擬當天最低氣溫	24.6℃
⑾模擬當天最高相對濕度	91.553
⑿模擬當天最低相對濕度	32.535
⒀模擬當天最大風速	3.526 M/S
⒁模擬當天最小風速	0.124 M/S
⒂植物最大葉內層水汽擴散阻力係數	0.235 HR/M

⒃植物最小葉內層水汽擴散阻力係數	0.038 HR/M
⒄洋香瓜簡易溫室之尺寸：	
棟深度	30公尺
棟寬度	7.2公尺
簷　高	1.75公尺
屋頂高度	3.3 公尺
⒅空氣密度	1.2 kg/M
⒆熱對流係數：	Kcal/m2.hr.℃
被覆材料內表面之對流係數	4.0
室內土壤與空氣之對流係數	4.0
植物與空氣之對流係數	4.0
室外土壤表面之對流係數	6.0
⒇吸收率：	
被覆材料之吸收率	0.15
植物之吸收率	0.75
土壤之吸收率	0.75
(21)熱容量(比熱)：	Kcal/M3
空氣之熱容量	0.29
植物之熱容量	1000.0
土壤之熱容量	700.0
(22)熱傳導係數：	Kcal/M.hr.℃
被覆材料之熱傳導係數	0.68
土壤之熱傳導係數	1.51
(23)水汽質量傳遞係數	17.8 Kcal/m2.hr
(24)被覆材料厚度	0.002M

⑵⑸長波輻射率(射出率)：	
被覆材料輻射率	0.6
植物之輻射率	0.98
土壤之輻射率	0.98
加熱器之輻射率(無加熱器)	0.0
⑵⑹遮蔽係數	0.99
⑵⑺反射率：	
土壤之反射率	0.25
土壤及植物之反射率	0.25
⑵⑻平均被覆材料之漫射透過率	0.75
⑵⑼葉表面蒸發阻力係數	0.027 HR/M
⑶⑽凝結實驗常數	1.0
⑶⑴土壤乾度實驗常數：	
室內土壤乾度實驗常數	0.05
室外土壤乾度實驗常數	0.05

8－2 模擬結果資料輸出

民國78年 6月28日開始模擬

時間	溫室溫度	室外氣溫	溫室濕度	室外濕度	32層地溫	35層地溫
1	26.103	26.174	89.015	88.407	26.998	26.706
2	25.734	25.739	89.587	89.293	26.994	26.717
3	25.357	25.304	90.157	90.178	26.989	26.724
4	25.045	24.952	90.399	90.585	26.983	26.728
5	24.871	24.776	90.843	91.069	26.976	26.730
6	25.225	25.117	90.308	90.582	26.969	26.728
7	26.883	26.562	84.521	85.678	26.961	26.724
8	29.391	28.618	74.519	77.076	26.953	26.717

9	32.422	31.367	62.221	64.729	26.946	26.711
10	35.359	34.211	48.467	49.656	26.942	26.708
11	37.341	35.973	39.191	39.753	26.941	26.711
12	38.610	36.983	34.069	34.382	26.946	26.725
13	40.117	37.500	32.533	32.535	26.959	26.751
14	40.754	37.077	34.039	36.035	26.981	26.791
15	40.317	35.973	37.726	42.108	27.017	26.846
16	38.555	34.234	43.629	50.093	27.067	26.915
17	35.819	32.495	51.928	58.131	27.132	26.996
18	33.224	30.569	61.366	67.958	27.209	27.085
19	31.601	29.182	68.304	75.813	27.295	27.179
20	30.647	28.500	72.278	79.522	27.387	27.274
21	29.872	27.925	75.445	82.556	27.483	27.367
22	29.216	27.443	78.066	84.949	27.579	27.457
23	28.648	27.032	79.683	86.179	27.675	27.542
24	28.251	26.792	82.960	89.209	27.769	27.620

結束模擬

8－3 風速及植物葉內層水汽擴散阻力係數之迴歸方程式

$F(X)=K0+K1X+K2X^2+K3X^3+K4X^4+K5X^5+K6X^6+K7X^7$

風速模擬回歸方程式

K0＝ 6.7937251108986E－001　K1＝ 5.4385459543127E－002

K2＝ 2.9947350344903E－002　K3＝-6.8967124101296E－003

K4＝ 2.3028934650368E－004　K5＝ 1.5235646617787E－005

K6＝-1.1362392599692E－006　K7＝ 1.8804883842276E－008

植物葉內層水汽擴散阻力係數模擬迴歸方程式

K0＝ 9.5840372671688E－001　K1＝ 9.1454907620352E－003

K2＝-4.4711248790424E－002　K3＝ 6.1154049160433E－003

K4＝-2.5373927454574E－004　K5＝-6.1789697782135E－006

K6＝ 7.2386611932962E－007　K7＝-1.3942263375990E－008

8－4 討論

(1)本模擬程程式分爲三部份：1)求形態係數程式　2)迴歸及繪圖程式　3)主系統程式；故在模擬前須先將溫室各面間之形態係數及外氣溫、濕度、風速、植物擴散阻力係數計算迴歸後，再代入主程式模擬。

(2)由於外氣溫及濕度經迴歸後不甚理想，故將主程式改爲直接將標準曲線的比例係數代入揷值計算之方式，使模擬結果更準確。

(3)本模擬程式之好處之一是若覺得所使用之迴歸方程式不盡理想可隨時抽換較理想之迴歸方程或改爲括值方式來模擬。

9.結果與討論

將實測值依第 7章之方法求出溫室內溫度的近似平均值及外氣溫、濕度、土壤溫度等實測值與模式所模挨之結果，用 LOTUS 123 繪出各變化圖來比較，其結論如下：

9－1初步結論

(1)圖9－1爲宙測外氣溫與模擬外氣溫之比較，由於實測值是瞬時的溫度值，故呈鋸齒狀分佈，而模擬值是由歷年平均外氣溫標準曲線所模擬的故較平滑連續，然縱觀全圖其變化趨勢非常接近，誤差在0～3℃左右，且最大誤差並非發生在最高或最低點，準確性相當高。

(2)圖9－2爲實測外氣相對濕度與模擬值之比較，同理實測值爲瞬時呈鋸齒狀分佈，而模擬值較平滑連續，誤差在0～30％左右，一般而言，台灣屬海島型氣候，外氣濕度變化原本就較大，故較難用歷年資料來模擬，然對兩曲線之走勢而言仍相當具有可靠性，且誤差最大值發生在凌晨 7點至10點左右，對溫室或植物並無太大

之妨礙。

(3)圖9－3爲溫室內溫度實測值與模擬值之比對，由圖中可看出在11點以後模擬值較實測值高，而在凌晨太陽出來前模擬值較實測值低，此正符合本模式的"預警"目的，而俱觀圖9－1及圖9－3可發現，溫室內溫度模擬誤差較大之點正好是外氣溫模擬誤差較大之點，由此可佑模擬值受外氣溫模擬值影響很大，且深信若以更準確(多年資料)的外氣溫來模擬將可得到更準確的結果，然若去除因外氣溫模擬誤差之部份，本模式仍相當準確。

(4)再由圖9－3可發現在凌晨2～6點之模擬值較外氣溫爲低，而實測值卻較外氣溫高，此現象是因本模式之發展主要是以玻璃被覆材料爲對象，故模擬值在夜間輻射冷卻效應較顯著，而實測值因溫室被覆材料爲塑膠布夜間仍可有長波輻射的能量，故輻射冷卻不明顯，而較外氣溫爲高。

(5)圖9－4爲溫室內相對濕度模擬值與實測值之比較，同理誤差之來源大部份來自外氣相對濕度的模擬誤差，若以較準確(多年資料)的外氣相對濕度代入，將可得到更正的結果，然從其走勢及中午12點後之資料顯示，模擬之準確度很高，誤差0～5%左右。

(6)圖9－5爲土壤32區塊之溫度比較圖，圖9－6爲土壤35區塊之溫度比較圖，由於深層土壤之溫度變化本就不大，故所模擬之土溫與實測值相差僅0.5℃以內，然此亦說明本模式對土壤之假設可行。

(7)本模式在應用時需以當地氣象台之多年溫度及濕度資料繪製溫濕度日變化標準圖，以早期就有觀測及氣象站密度高之本省以求得Ci及Di值應無問題，但若將之用於無氣象觀測站之區域則應先觀測一段時間，才能應用本模式。

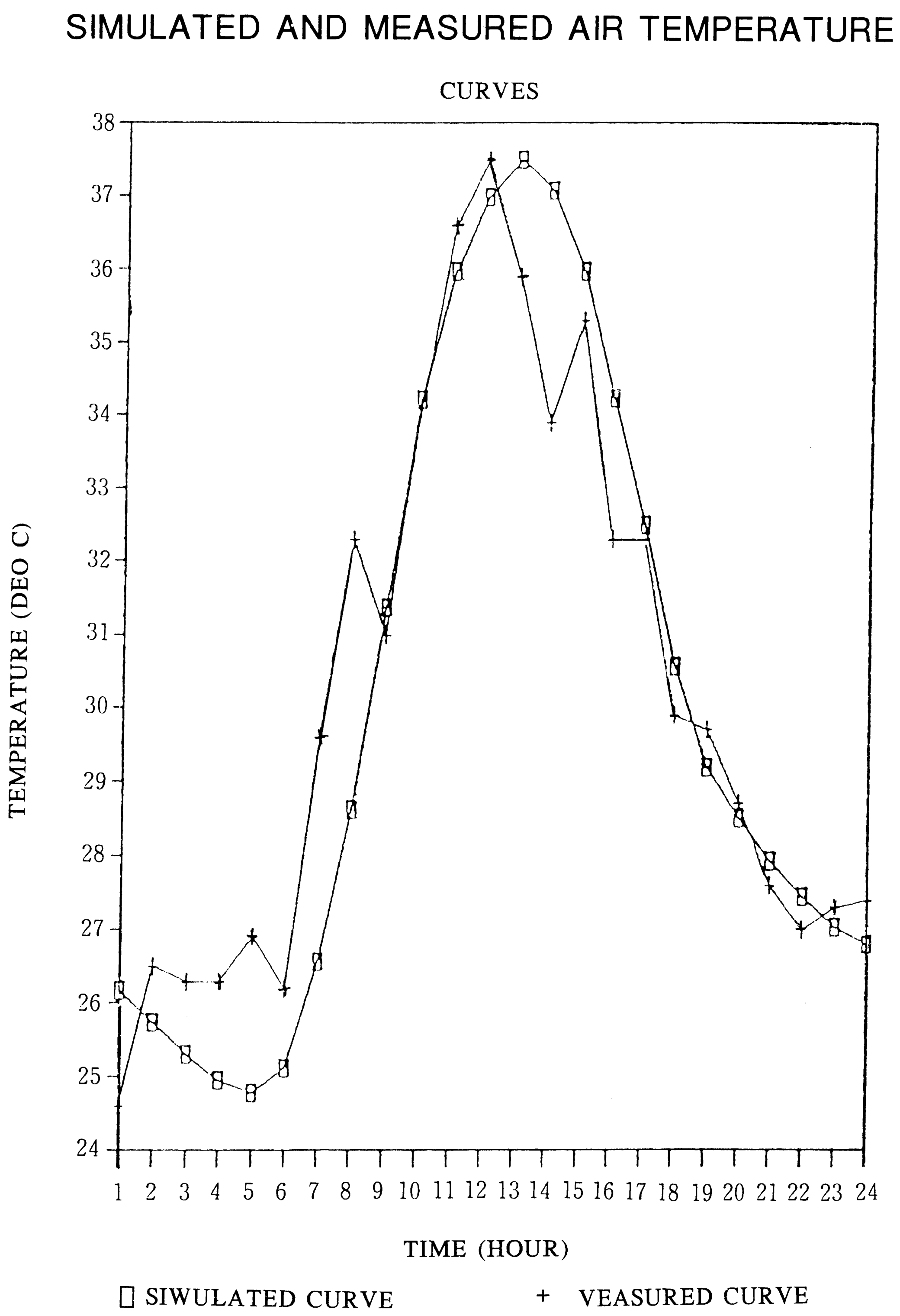


圖9－1 外氣溫實測與模擬值之比較

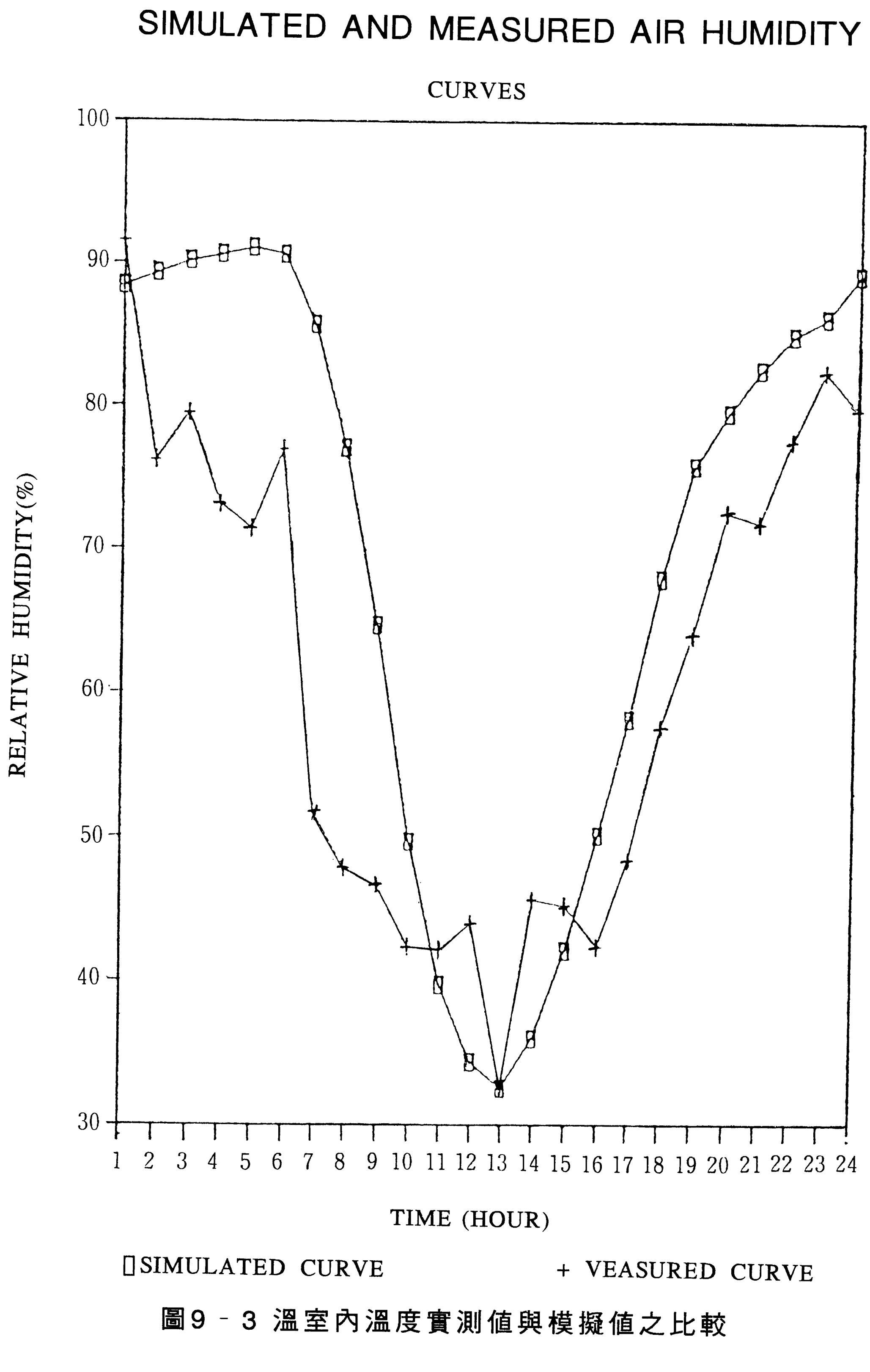


圖9－3 溫室內溫度實測值與模擬值之比較

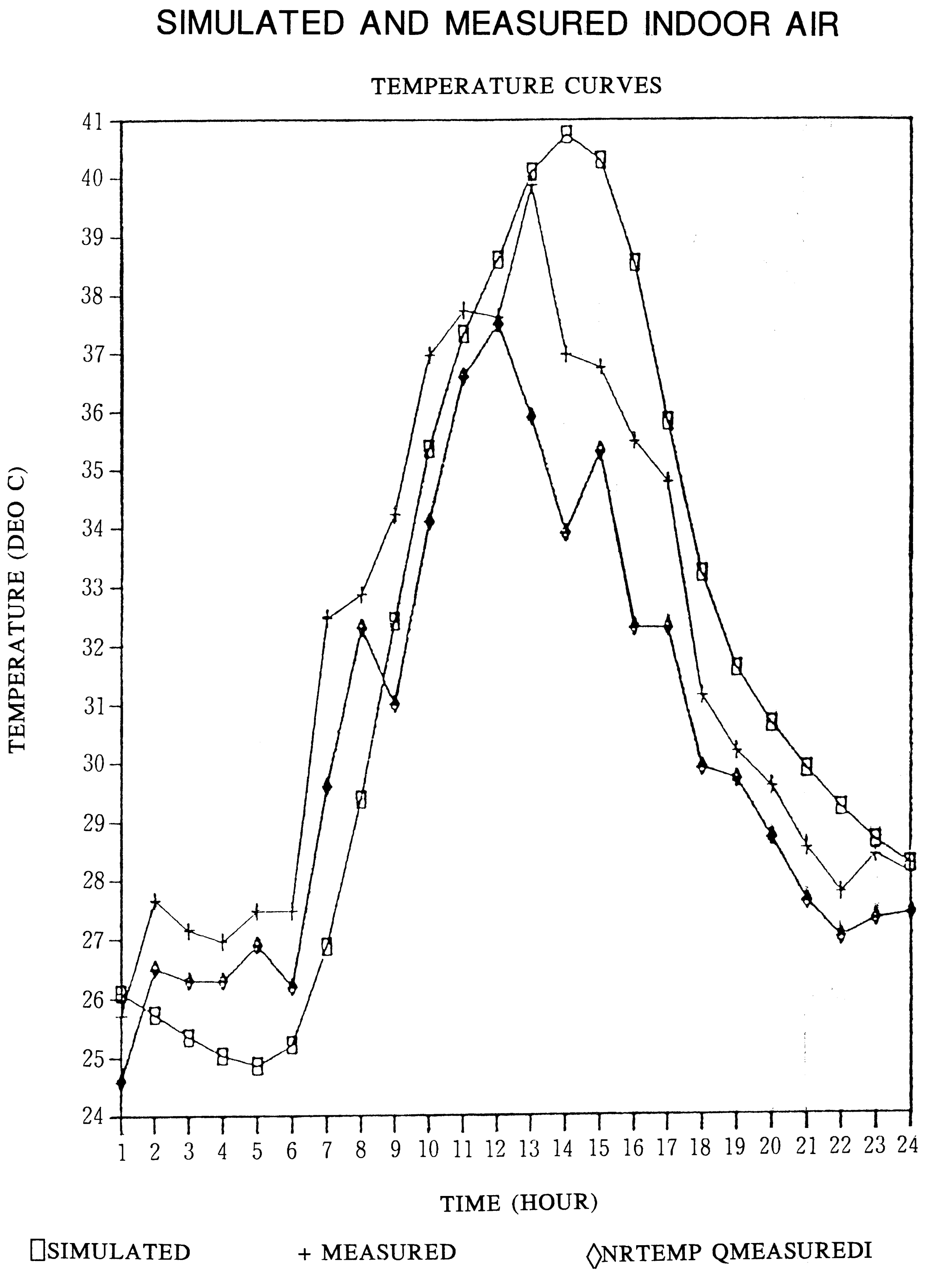


圖9－4 溫室內相對濕度模擬值與實測值之比較

SIMULATED AND MEASURED INDOOR RELATIVE

HUMIDITY CURVES

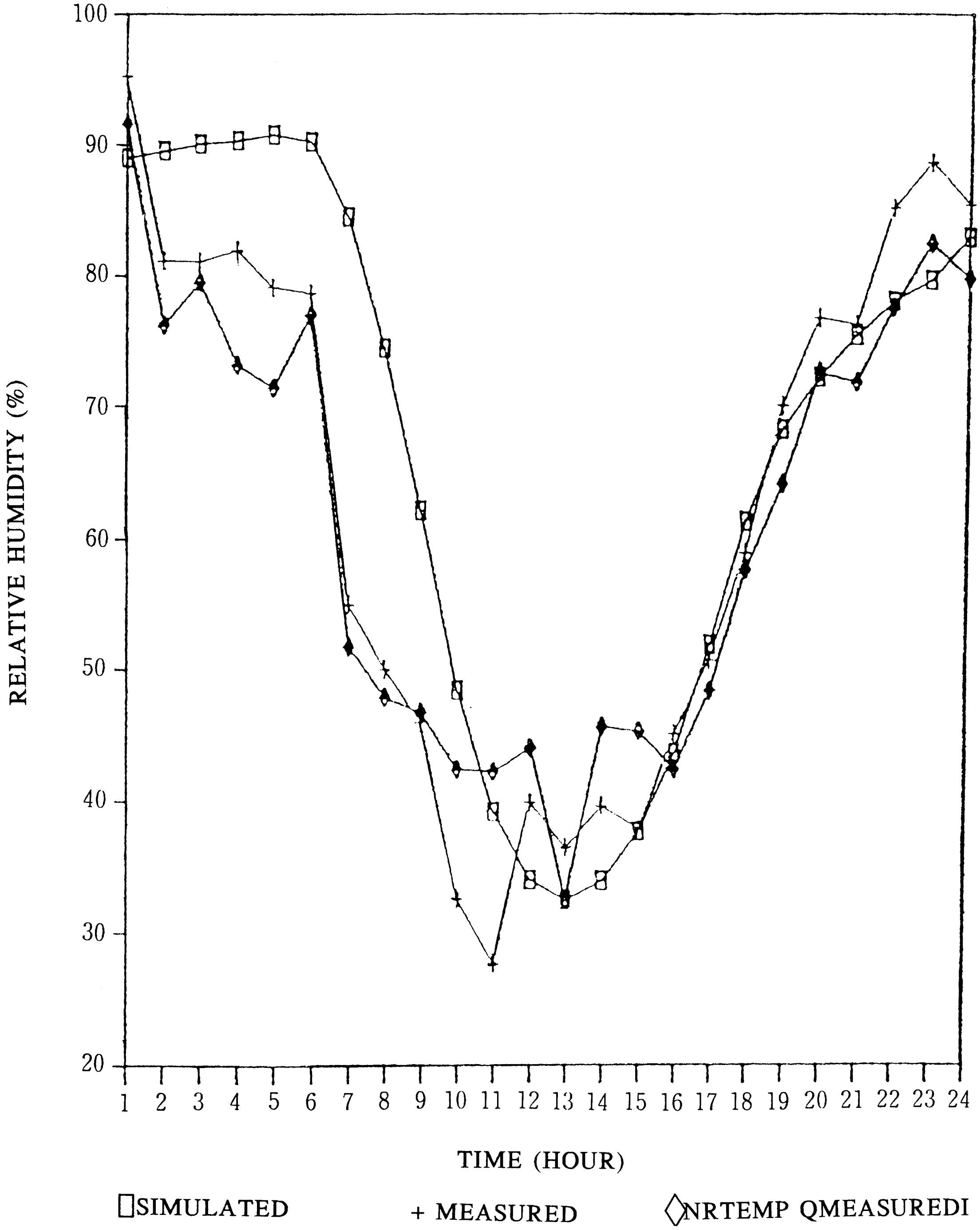


圖9－5 土壤32區塊之溫度比較圖

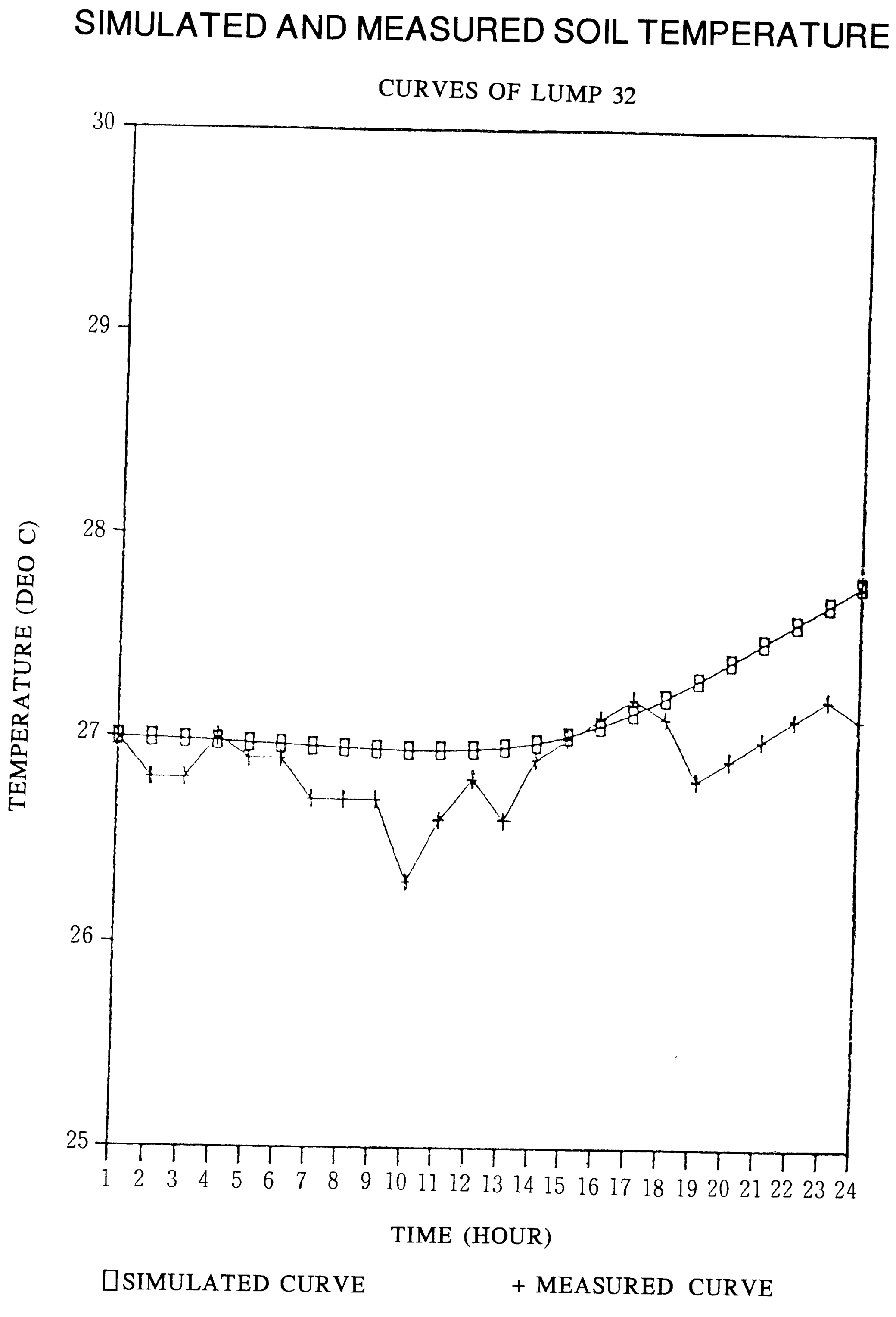


圖9－6 土壤35區塊之溫度比較圖

9－2 外氣候應答式之結果討論

由初步之結果可知溫室內溫度與濕度模擬的主要誤差來自外氣溫、濕度的模擬，故在本節將改變外氣候標準曲線，以實測當天的外氣溫、濕度的標準曲線取代歷年的標準曲線來模擬驗証，以做爲日後應答式自動化控制系統發展之參考，其結果如下：

(1)圖9－7爲以當天之外氣溫標淬曲線所模擬的值與實測值之比對，可發現精確相當高幾乎重合。

(2)圖9－8爲以當天之外氣相對濕度標準曲線所模擬的值與實測值之比對，同理亦幾乎重合。

(3)圖9－9爲應答式之溫室內溫度模擬比較，由圖中可看出準確度大大提高，全天最大誤差約3℃以內。

(4)圖9－10爲應答式之溫室內濕度模擬比較，亦可由圖中看出準確度提高一半以上，全天最大～差約15％以內。

(5)由此可知本模式之精確度很高，且精確度隨外氣溫、濕度之標準曲線精度提高而提高。

SIMULATED AND MEASURED AIR TEMPERATURE

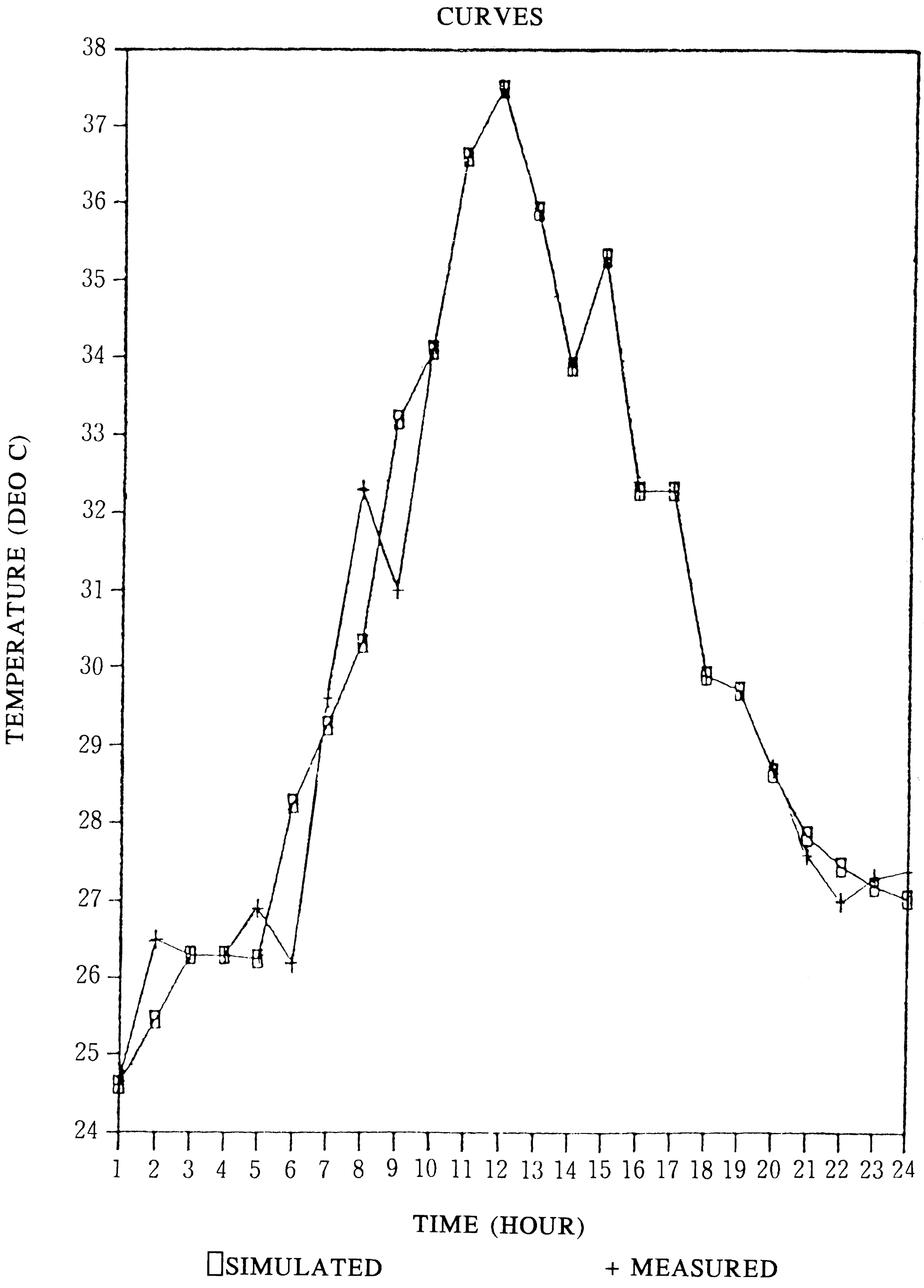


圖9－7 應答式之外氣溫變化曲線

SIMULATED AND MEASURED AIR RELATIVE HUMIDITY CURVES

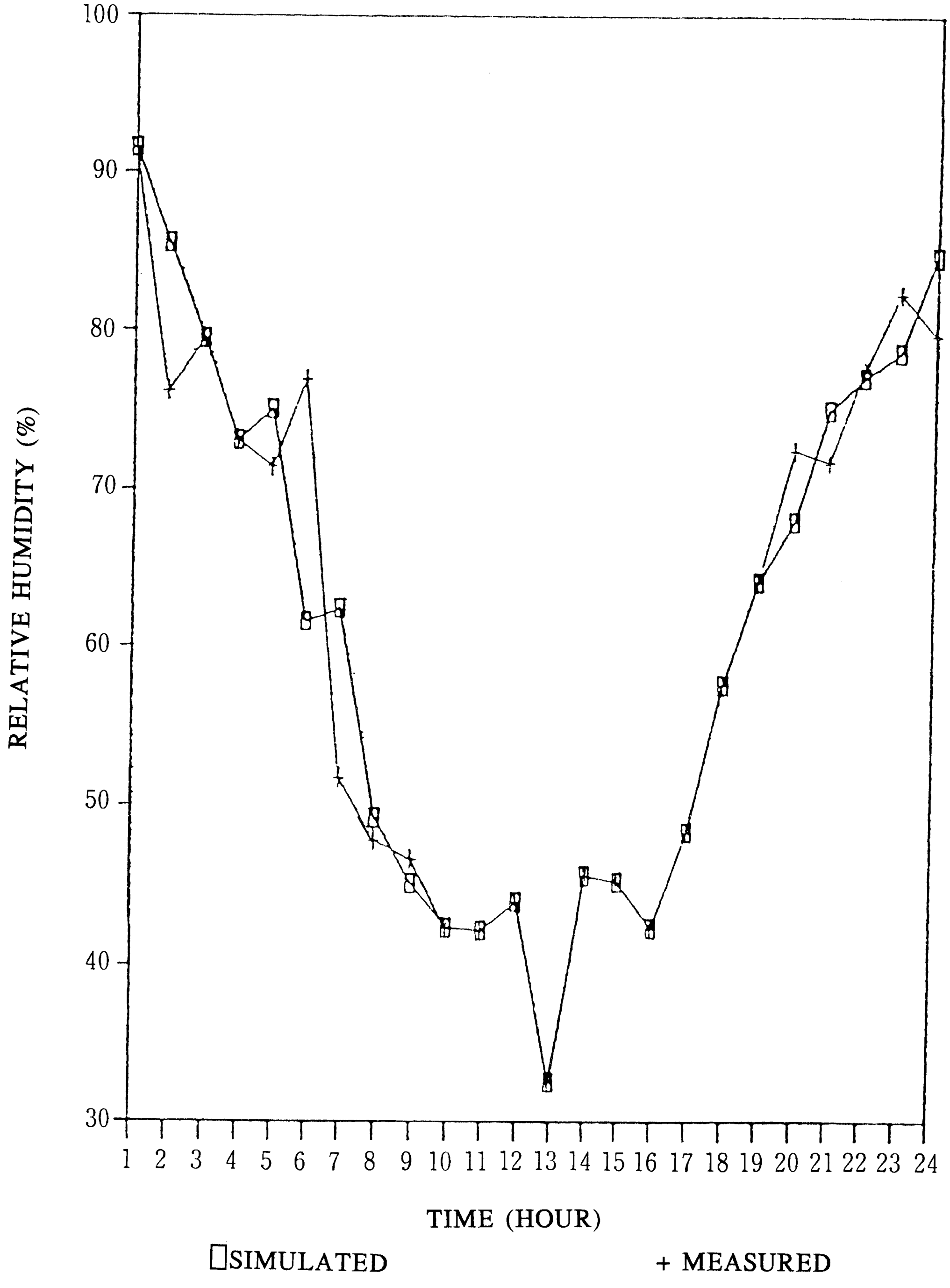


圖9－8 應答式之外氣相對濕度變化曲線

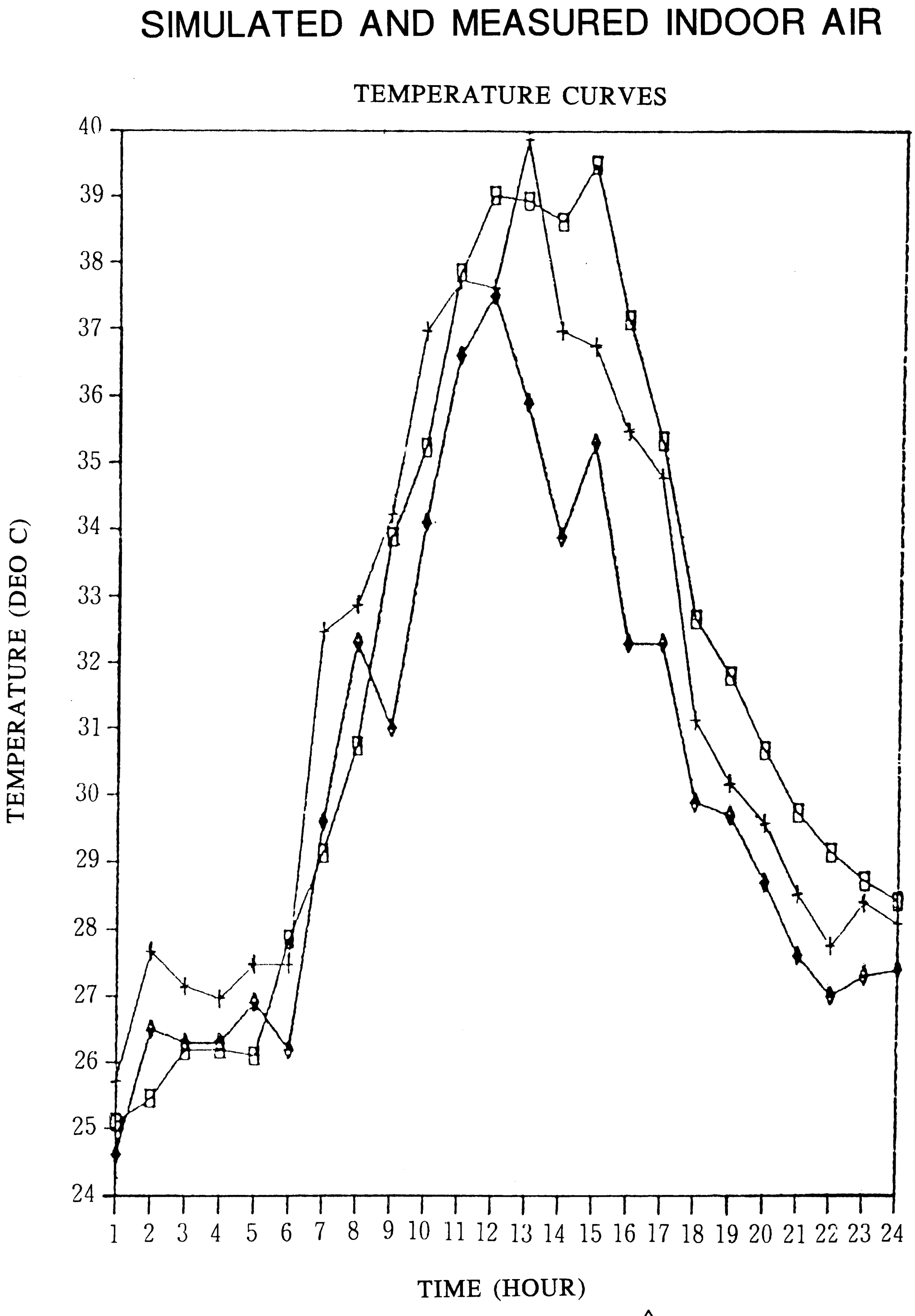


圖9－9 應答式之溫室內溫度模擬比較

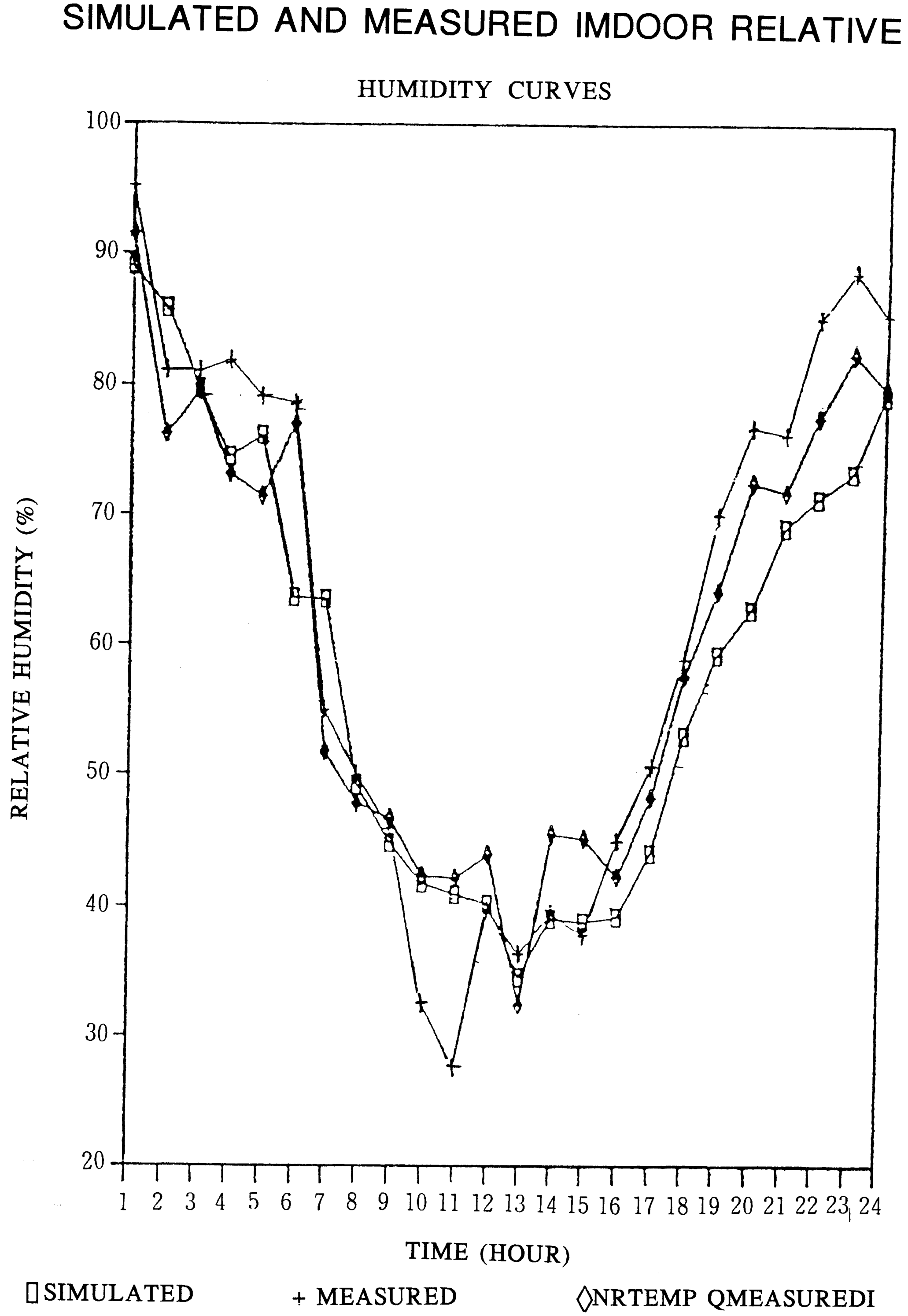


圖9－10 應答式之溫室內相對濕度模擬比較

誌　謝：

本文之得以完成承蒙國科會(NSC 77-0409-B002-95)以農委會〔79-農建-71-糧-107-(15)〕之全部金額支助。本研究室(農業設施研究室)歷屆研究生通力合作計測，尤其邱文山同學在電腦程式方面項獻更多，本文才能完稿，在此特致謝忱。

10.參考文獻

(1)于若石，68年，畜舍內溫度與濕度控制設計模式之研究，台大農工所碩士論文，P13～49 。

(2)王鼎盛，77年，設施園藝設計手冊，行政院農業委員會補助，台大農工系農業設施研究室　編印，P199～263。

(3)王錦堂，66年，建築應用物理學，台隆書店，P183～197，P265～366，P401～408。

(4)公曉嵐、黃銘山　譯，76年，熱力學，乾泰圖書，P31～P87。

(5)郭魁士，74年，土壤學，中國書局，P409～571。

(6)陳寶玉　譯，75年，溫室管理，五洲，P17～53，P135～230。

(7)設施園藝研討會專集　76，6，P185～193，P125～143。

(8)黃文雄，67年，太陽能之應用及理論，協志工業叢書，P19 ～118，P126，P589。

(9)農業氣象　Vol 43 (2)，1987，P113～P120。

(10)楊春欽，毛迪 譯，74年，熱傳遞學，科技，P2～442，P495～513。

(11)賴鵬程，74年，太陽能系統分析與設計，全華科技圖書，P1～P43，P307～P323。

(12)蘇金佳　譯，71年，太陽能工程原理(上冊)，科技，P34～187。

(13)小倉祐幸，1985，被覆栽培の環境條解，日本農林統計協會，P38～54，P113～118。

(14)宇田川 光弘，1986，空氣調和計算法，日本才一社，P26 ～159。

(15)蓑輪雅好，1986，10，日本香川大學農學部紀要，第47號 "開放型畜舍の放射熱環境に關する研究"，P31～53，P75～92。

(16)藏田憲次，岡田益己，1984，環境工學入門，日本株式會社サイエンスハウス，P1～149。

(17) Avissar, R., and Mahrer, Y., 1982. Verification study of a numerical greenhouse microclimate model. Trans. ASAE, 25, 1711-1720。

(18) Bot, G.P.A.,1983. Greenhouse climate: From physical processes to a dynamic model. Doctor's dissertation, LH Wageningen, 240pp

(19) Businger, J.A., 1963. The glasshouse (greeenhouse) climate. In: Physics of Plant Environment (ed. by W.R. van Wijk). North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 277 -318

(20) Chandra, P., Albright, L.D., and Scott, N.R., 1981. A time dependent analysis of greenhouse thermal environment. Trands. ASAE, 24, 442-449.

(21) Esmay, M. L. & J. E. Dixon, 1986, "Environmental Control for Agricultural B uildings", AVI Co. P1～285

(22) Froehlich, D. P., L. D. Albright, N. R., Scott, P. Chandra, 1979, Steady -per iodic analysis of glasshouse thermal evironment, Trans. of the ASAE, P387～398

(23) Gerald, C. F. and P. O. Wheatley, 1985, "Applied numerical analysis", P337～343, P247～326, P580～629

(24) Hiller,F.,1957.Warmehaushalt und Klimafaktoren des Gewachshauses.

Heiz. Luft. Haustechn., 8, 115-119., 153-157; 181-184; 201-204

(25) Kimball, B.A. 1973. Simulation of the energy balance of a greenhouse. Agric . Meteor. 11, 243-260

(26) Kindelan, M., 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. Trans. ASAE , 23, 1232-1239

(27) Lawrence, W.J.C., 1963. Science and the Glasshouse(3rd ed.). Oliver and Boyd, London, 183pp.

(28) Morris, L.G., and Winspear, K.W., 1954. The effect of solar radiation on measurement of glasshouse air temperature. Tech.Memo., No.102, 9pp., NIAE.

(29))O'Flaherty, T., Gaffney, B.J. and Walsh, J.A., 1973. Analysis of the temperature control characteristics of heated greenhouse using an analog computer. J. agric Engng Res., 18, 117-132.

(30) Renard. W.,1956. Kunstoffe fur die Uberdeckung von Kulturflachen. Gartenwelt, 56, 249-253

(31) Siebert, L., and Renard, W., 1962. Warmebedarf von Gewachshausern. Heiz. Luft. Haustechn., 13 101-105.

(32) Soribe, F.I. and Curry, R.B., 1973. Simulation of lettuce growth in an air-supported plastic greenhouse. J.agric. Engng Res., 18, 113-140

(33) Sugi, J., and Takakura, T.1965. A fundamental study on the control of glasshouse. J. agric. Meteor., 20, 147-153.

(34) Takakura, T., 1967 and 1968. Predicting air temperatures in the gresshouse I and II. J. Meteor. Soc. Jap. 45, 40-52; 46, 36-43.

(35) Takakura, T., K. A. Jordan and L. L. Boyd, 1971, Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse, Trans. ASAE. P964～971

(36) Van Bavel, C.H.M., T.Takakura, and G.P.A.Bot., 1985, Global comparison of three greenhouse climate models, Acta Horticulturae 174, p21～33.

(37) Von Elsner, B. 1982. Das Kleinklima und der Warmever-brauch von gesch lossenen Gewachshausern. Inst. Tech. in Gartenbauund Landwirtschaft Univ. Hannover, He ft 12, 197pp.

(38) Whittle, R.M. and Lawrence, W.J.C., 1959 and 1960. The climatology of glassh ouse: I, II, III, IV, and V.J. agric. Engng Res., 4, 326-340; 5, 36-41; 5, 165-178; 5, 399-405

(39) Yabuki, K., and Imazu, T., 1961. Studies on the temperature control of glass house I. J. Jap.Soc. Hort. Sci., 30, 171-177.

附 錄 1. 符號說明

Ag	：被覆材料表面積〔m^2〕
Ah	：加熱器之表面積
Ap	：葉子表面積
As	：土壤之表面積
Asj	：表第 j塊被覆材料投射在溫室內土壤所佔之面積
Ca	：空氣之定壓比熱,0.25〔Kcal/m^3 ° K〕
Cgj	：被覆材料對 j物體之溫度積〔° K^3〕
Cpa	：乾燥空氣之比熱，約0.24
Cpl	：植物之比熱〔Kcal/m^3 ° K〕
Cpw	：濕空氣之比熱，約0.441
Cs	：土壤之比熱〔Kcal/m^3 ° K〕
E	：均時差
fs(t)	：遮蔽係數
h	：太陽高度
hih(t)	：加熱器之對流係數〔Kcal/m^2 hr℃〕
hin(t)	：被覆材料內表面之對流係數〔Kcal/m^2 hr℃〕
his(t)	：空內土壤之對流係數〔Kcal/m^2 hr℃〕
hou(t)	：材料外表面之對流係數〔Kcal/m^2 hr℃〕
h'ven(t)	：表單位被覆材料面積之通風量〔m/hr〕
j	：表被覆材料、植物、土壤、加熱器……等。
j_0	：太陽常數約1164〔Kcal/m^2〕
Kg	：被覆材料之熱傳導係數〔Kcal/m hr ℃〕
Km	：水蒸氣質量傳導係數〔Kg/m^2 hr〕

Ks	：	土壤之熱傳導係數〔Kcal/m hr° K〕
L	：	經度(東經爲正，西經爲負)
Lg	：	被覆材料之厚度〔m〕
Ls	：	標準子午線經度(東經爲正，西經爲負)
N(t)	：	換氣回數〔回數/hr〕
r	：	地球與太陽間之平均動徑，其値約爲 1左右
ra	：	葉表面蒸發阻力係數〔hr/m〕
risp	：	溫室內地表之反射率
rl(t)	：	葉內層水蒸氣擴散阻力係數〔hr/m〕
ros	：	土壤之反射率
Rdd(t)	：	直接日射量
Rlg(t)	：	被覆材料名表面之長皮淨輻射量
Rsd(t)	：	水平面直達日射量
Rss(t)	：	漫射量
t	：	表時角，直太陽時之正午爲0℃，午前爲負，午後爲正，一小時15℃，午前
t.a	：	眞太陽時
ts	：	標準時
μ	：	水蒸氣蒸發或凝結之潛熱容量〔Kcal/Kg〕
Vg	：	溫室內空氣體積〔m^3〕
Vp	：	植物之體積
Win(t)	：	室內空氣之比濕度
Ws(θ ig)	：	飽和比濕度
X	：	絕對濕度，常溫時 X約0.03
α g	：	被覆材料之吸收率

α p	：	植物之吸收率
τ d(t)	：	平均被覆材料透過率(受日照面)
τ g(t)	：	平均被覆材料有效透過率
τ m	：	大氣透過率
τ s	：	平均被覆材料透過率
ε g	：	被覆材料之射出率
ε j	：	j物體之射出率
σ	：	波茲曼常數(Stefan-Boltzmann Coef0)約4.88 E-8〔Kcal/m^2 hr OK4〕
ρ	：	表空氣密度〔kg/m3〕
ξ	：	表太陽赤緯，春分、秋分ξ＝θ℃，夏至ξ＝23℃ 27-，冬至ξ＝-23℃27-
ξ (t)	：	被覆材料內表面直接日照之比率
Ψ	：	表緯度，北半球Ψ＞θ，南半球Ψ＜θ
Ψ j	：	為被覆材料對太陽之傾斜角
θ og(t)	：	被覆材料外表面溫度
θ ou(t)	：	外氣溫
λ (t)	：	材料外表面直接日照之比率
η is	：	內部土壤對被覆材料內表面之形態係數
η g	：	被覆材料對天空之形態係數
Kg	：	被覆材料之熱傳導係數〔Kcal/m hr ℃〕
Km	：	水蒸氣質量傳導係數〔Kg/m2 hr〕
Ks	：	土壤之熱傳導係數〔Kcal/m hr OK〕
L	：	經度(東經為正，西經為負)
Lg	：	被覆材料之厚度〔m〕

Ls	：	標準子午線經度(東經爲正，西經爲負)
N(t)	：	換氣回數〔回數/hr〕
r	：	地球與太陽間之平均動徑，其值約爲 1左右
ra	：	葉表面蒸發阻力係數〔hr/m〕
risp	：	溫室內地表之反射率
rl(t)	：	葉內層水蒸氣擴散阻力係數〔hr/m〕
ros	：	土壤之反射率
Rdd(t)	：	直接日射量
Rlg(t)	：	被覆材料外表面之長波淨輻射量
Rsd(t)	：	水平面直達日射量
Rss(t)	：	漫射量
t	：	表時角，眞太陽時之正午爲0℃，午前爲負，午後爲正，一小時15℃之分割
ta	：	眞太陽時
ts	：	標準時
μ	：	水蒸氣蒸發或凝結之潛熱容量〔Kcal/Kg〕
Vg	：	溫室內空氣體積〔m^3〕
Vp	：	植物之體積
η gj	：	被覆材料對 j物體之形態係數
η ss	：	土壤對被覆材料之形態係數
ξ ig	：	凝結實驗常數(此以被覆材料爲標準定爲 1)
ξ is	：	表內部土壤水蒸發實驗常數